İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALTLIK ÜZERİNE ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE KAPLANAN SERAMİK VE SERAMİK-POLİMER KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Ufuk AKIN

Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME

MAYIS 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALTLIK ÜZERİNE ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE KAPLANAN SERAMİK VE SERAMİK-POLİMER KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Ufuk AKIN
(506011126)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof.Dr. E. Sabri KAYALI
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU
Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Çalışmam süresince ilgi ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, tez danışmanı hocam Sayın Prof. Dr. E. Sabri KAYALI ’ya saygılarımla şükranlarımı sunarım.

Çalışmamla çok yakından alakadar olması ve beni sürekli yönlendirmesi sebebiyle hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU ’na en içten teşekkürlerimi sunarım. Bilgi ve tecrübelerini daima benimle paylaşan, bana yol gösteren ve çalışmamın her aşamasında emeği geçen hocam Araş. Gör. Yük. Müh. Harun MİNDİVAN ’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, ilgi ve yardımlarından dolayı tüm mekanik metalurji laboratuarı araştırma görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Deney numunelerinin kaplanması ve SEM incelemeleri için yardımlarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Ramazan SAMUR ’a teşekkür ederim.

Beni yetiştiren, bugünlere gelene dek maddi ve manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve bu çalışma sırasında beni sürekli destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

MAYIS 2003 Ufuk AKIN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **ii**
KISALTMALAR **iv**
TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
ÖZET **x**
SUMMARY **xi**
1. GİRİŞ **1**
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı 1
2. SERAMİK KAPLAMALAR **2**
2.1. Giriş 2
2.2. Oksit Seramik Kaplamalar 3
2.2.1. Alümina Kaplamalar 3
2.2.2. Krom Oksit Kaplamalar 4
2.2.3. Zirkonya Kaplamalar 5
3. ISIL PÜSKÜRTME **6**
3.1. Giriş 6
3.2. Isıl Püskürtme İşlemi 6
3.3. Kaplama Malzemeleri 8
3.4. Uygulama Alanları 8
3.5. Isıl Püskürtme Yöntemleri 8
3.5.1. Alevle Püskürtme 9
3.5.2. Elektrik Ark Püskürtme 12
3.5.3. Patlamalı Tabanca İle Püskürtme 13
3.5.4. Plazma İle Püskürtme 15
4. OKSİT SERAMİK KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARI **16**
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **19**
5.1. Kaplama Prosesi 19
5.2. Kaplamaların Karakterizasyonu 20
5.3. Aşınma Deneyleri 20
6. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ **22**
6.1. Kaplama Karakterizasyonu Sonuçları 22
6.2. Aşınma Deneyi Sonuçları 24
6.2.1. Seramik Kaplamalar 24
6.2.2. Karma Kaplamalar 29
7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER **33**
KAYNAKLAR **34**
EKLER **37**
ÖZGEÇMİŞ **83**

KISALTMALAR

CVD	: Chemical Vapour Deposition
PVD	: Physical Vapour Deposition
HIP	: Hot Isostatic Pressing
HVOF	: High Velocity Oxy-Fuel
DGS	: Detonation Gun Spraying
PTFE	: Poly Tetra Fluor Ethylen

TABLO LİSTESİ

No		Sayfa
Tablo 2.1.	Seramik film ve kaplamaların kullanım yerleri	2
Tablo 2.2.	Seramik kaplama yöntemleri ve kullanılan seramik tozları	3
Tablo 2.3.	Aşınmaya dirençli oksit seramik kaplamalar ve aşınma özellikleri	3
Tablo 3.1.	Ticari ısıl püskürtme yöntemlerine ait bazı önemli özellikler	10
Tablo 5.1.	Kullanılan kaplama tozlarının özellikleri	19
Tablo 6.1.	İncelenen seramik kaplamaların bazı özellikleri	22

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 **:** Isıl püskürtme ile kaplama işleminin şematik gösterimi……... 7
Şekil 3.2 Isıl püskürtülmüş kaplamanın şematik kesit görüntüsü……. 7
Şekil 3.3 Alevle toz püskürtme işleminin şematik tasviri……. 11
Şekil 3.4 Alev ile tel, çubuk, şerit püskürtme işleminin şematik tasviri….. 12
Şekil 3.5 Elektrik ark püskürtme işleminin şematik tasviri…….. 13
Şekil 3.6 Patlamalı tabanca ile püskürtme işleminin şematik tasviri……. 14
Şekil 3.7 Plazma püskürtme ile kaplamanın şematik tasviri……. 15
Şekil 5.1 Salınım hareketli aşınma deney cihazının şematik tasviri……. 21
Şekil 6.1 (a) Cr_2O_3 , (b) ZrO_2CaO, (c) $Al_2O_3TiO_2$ ve (d) Al_2O_3 kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri. (100X)…. 23
Şekil 6.2 Altlık malzemede ve seramik kaplamalarda (a) alümina ve (b) çelik bilyelerle gerçekleştirilen aşınma deneylerinde oluşan aşınma iz alanlarının normal yükle olan ilişkileri..... 25
Şekil 6.3 Altlık malzemenin ve seramik kaplamaların (a) alümina ve (b) çelik bilyelerle gerçekleştirilen aşınma deneylerinde gösterdikleri sürtünme katsayıları ile normal yükün ilişkisi..... 26
Şekil 6.4 (a) Alümina ve (b) çelik bilyelerle aşındırılan seramik kaplamaların aşınma iz alanları ile karalı hal sürtünme katsayıları arasındaki ilişki (Yük=930 g)…… 27
Şekil 6.5 (a) Alümina ve (b) çelik bilyelerle aşındırılan seramik kaplamaların aşınma iz alanları ile kaplama sertlikleri arasındaki ilişki (Yük=930 g)..... 28
Şekil 6.6 (a) Alümina ve (b) çelik bilyelerle aşındırılan seramik ve karma kaplamalarda oluşan aşınma iz alanlarının karşılaştırması (Yük=930 g)..... 29
Şekil 6.7 Seramik ve karma kaplamaların (a) alümina ve (b) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneylerinde gösterdikleri kararlı hal sürtünme katsayılarının kıyaslanması (Yük = 930 g)..... 30
Şekil 6.8 Seramik ve karma kaplamalarda (a) alümina ve (b) çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu birim yük ve birim turda oluşan aşınma iz alanlarının kıyaslanması……. 32
Şekil A.1 Cr_2O_3 kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı……. 37
Şekil A.2 ZrO_2CaO kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı…… 38
Şekil A.3 $Al_2O_3TiO_2$ kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı…….. 39
Şekil A.4 Al_2O_3. kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı……. 40
Şekil B.1 (a) Cr_2O_3 (b) ZrO_2CaO (c) $Al_2O_3TiO_2$ ve (d) Al_2O_3 kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri (50X)……. 41
Şekil B.2 (a) Cr_2O_3 (b) ZrO_2CaO (c) $Al_2O_3TiO_2$ ve (d) Al_2O_3 kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri (200X)……... 42
Şekil C.1 Cr_2O_3 kaplamanın (a) 496 g, (b) 737 g, ve (c) 930 g yük ile

yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye)……..... 43
Şekil C.2 Cr_2O_3 kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme çelik bilye)…….. 44
Şekil C.3 ZrO_2CaO kaplamanın (a) 496 g, (b) 737 g, ve (c) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye)..……... 45
Şekil C.4 ZrO_2CaO kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye)…..... 46
Şekil C.5 $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye)…… 47
Şekil C.6 $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye)…… 48
Şekil C.7 Al_2O_3 kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g,ve (c) 737 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye)……. 49
Şekil C.8 Al_2O_3 kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye)…… 50
Şekil C.9 Altlık malzemenin (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye)…… 51
Şekil C.10 Altlık malzemenin (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye)…… 52
Şekil C.11 Cr_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve(d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri……... 53
Şekil C.12 ZrO_2CaO / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri…….. 54
Şekil C.13 $Al_2O_3TiO_2$ / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri…….. 55
Şekil C.14 Al_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri…… 56
Şekil C.15 Çıplak altlık üzerindeki teflon kaplamanın (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük - çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri….. 57
Şekil D.1 Cr_2O_3 kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan

aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…….. 58
Şekil D.2 ZrO_2CaO kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…….. 59
Şekil D.3 $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…… 60
Şekil D.4 Al_2O_3 kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…….... 61
Şekil D.5 Altlık malzemenin (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…….. 62
Şekil D.6 Cr_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…….. 63
Şekil D.7 ZrO_2CaO / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…….. 64
Şekil D.8 $Al_2O_3TiO_2$ / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…… 65
Şekil D.9 Al_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)…….. 66
Şekil D.10 Altlık / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g)..... 67
Şekil E.1 Altlık malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır).. 68
Şekil E.2 $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır)..... 69
Şekil E.3 Al_2O_3 kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır)…. 70
Şekil E.4 ZrO_2CaO kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır)..... 71
Şekil E.5 Cr_2O_3 kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır)…. 72
Şekil E.6 Altlık malzemenin a) 275g b) 496 g ve c) 930 g yük ile yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır)…… 73
Şekil E.7 ZrO_2CaO malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük

ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır)..... 74
Şekil E.8 Al_2O_3 malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır)…….. 75
Şekil E.9 $Al_2O_3TiO_2$ malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır) 76
Şekil E.10 Cr_2O_3 malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır)……77
Şekil E.11 Çıplak altlık üzerine kaplanan teflonun a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi..... 78
Şekil E.12 $Al_2O_3TiO_2$ / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi..... 79
Şekil E.13 Al_2O_3 / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi..... 80
Şekil E.14 ZrO_2CaO / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi…… 81
Şekil E.15 Cr_2O_3 / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi…… 82

ÖZET

Hafif metaller ve alaşımları sağladıkları ağırlık tasarrufu nedeniyle her gün biraz daha önem kazanmaktadır. Ancak bu malzemelerin sertlikleri ve mukavemetleri düşük olduğundan tribolojik uygulamalarda çoğu zaman yetersiz kalmaktadırlar. Uygun yüzey geliştirme yöntemlerinin seçimi ve uygulanmasıyla bu malzemelerin tribolojik özellikleri geliştirilebilmektedir.

Bu çalışmada ticari saflıktaki alüminyum üzerine alevle püskürtme yöntemiyle kaplanmış Cr_2O_3, ZrO_2CaO, Al_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ olmak üzere dört farklı oksit seramik kaplamanın ve bu kaplamaların üzerine daldırma yöntemiyle teflon kaplanarak oluşturulan seramik/teflon karma kaplamaların, kuru kayma koşulundaki aşınma davranışları, farklı yükler kullanılarak salınım hareketli (reciprocating) aşınma test cihazında ayrı ayrı incelenmiştir.

Seramik kaplamalar arasından Cr_2O_3 kaplama en sert kaplama olup, her iki bilyeye karşı yapılan aşınma deneylerinde en yüksek aşınma direncini göstermiştir. Alümina bilye ile yapılan deneylerde aşınma direncinin büyükten küçüğe sıralaması Cr_2O_3, ZrO_2CaO, Al_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ iken çelik bilyede bu sıralama Cr_2O_3, $Al_2O_3TiO_2$, Al_2O_3 ve ZrO_2CaO şeklindedir.

Seramik kaplamaların üzerine teflon kaplanması sürtünme katsayısını büyük ölçüde düşürerek 0.1 değerinin altına indirmiştir. Bu sayede aşınma azalmış ve karma kaplamaların servis ömrü artmıştır. İncelenen seramik kaplamalar arasında en az aşınan Cr_2O_3 'ün, üzerine teflon kaplanmasıyla elde edilen Cr_2O_3 / teflon karma kaplama da en yüksek aşınma direncini göstermiştir.

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF THERMALLY SPRAYED CERAMIC AND CERAMIC-POLYMER COATINGS ON ALUMINUM.

SUMMARY

Light metals exhibit insufficient tribological performance due to their low hardness and strength. Their tribological properties can be improved by the selection and application of the convenient surface modification technologies.

In this study, the wear behaviours of Cr_2O_3, ZrO_2CaO, Al_2O_3 and $Al_2O_3TiO_2$ oxide-ceramic coatings and the combined coatings (oxide ceramic + teflon) formed on commercial purity aluminum have been examined. Ceramic coatings were applied by flame spray technique, while the combined coatings were obtained by dipping these oxide-ceramic coated materials in teflon solution and then curing. The wear performances of the ceramic and combined coatings were investigated by a reciprocating wear tester utilising alumina and steel balls with different loads under dry sliding conditions.

Among the examined ceramic coatings, maximum hardness and wear resistance was obtained from Cr_2O_3 coating. Furthermore, application of teflon layer on Cr_2O_3 ceramic coating achieved the maximum resistance to wear when compared to the other combined coatings.

1.GİRİŞ

1.1.GİRİŞ VE AMAÇ

Alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi hafif metaller ve alaşımları ekonomik ve ekolojik nedenlerden dolayı endüstride yoğun bir biçimde kullanılmaktadırlar. Ancak bu malzemelerin sertlikleri ve mukavemetleri düşük olduğundan çoğu zaman düşük aşınma direnci gösterirler [1].

Sağladıkları ağırlık tasarrufu nedeniyle kullanılma gerekliliği her gün biraz daha artan hafif metal ve alaşımlarının tribolojik özelliklerini geliştirmek için çeşitli endüstriyel yöntemler uygulanmaktadır. Aşınmaya karşı alınabilecek en basit önlem, tüm elemanların aşınmaya dayanıklı malzemeden imal edilmesidir ancak bu yaklaşım çoğu zaman yüksek maliyeti de beraberinde getirir. Aşınma bir yüzey hadisesi olduğundan uygun bir kaplama seçimiyle elemanın ömrü azami seviyeye çıkarılabileceği gibi maliyeti de asgariye düşürülebilir [2]. Bir malzeme kendisinden daha sert bir kaplamaya sahip olduğunda, kaplama varoldukça ana malzemedeki aşınma azalmış olacaktır çünkü aynı şartlar altında sert malzemeler yumuşak malzemelerden genellikle daha az aşınırlar [3,4].

Aşınmaya dayanıklı sert kaplamalar oluşturmak için ısıl püskürtme yöntemleri 20.yy'ın başından beri kullanılmaktadır. Yöntemin esası toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesinin ergiyik yada kısmi-ergiyik duruma getirilerek, kaplanacak yüzeye olabildiğince hızlı bir şekilde püskürtülmesine dayanır [4]. Bu yöntemle oluşturulan alümina, krom oksit, zirkonya gibi oksit seramik kaplamalar yüksek aşınma direncinin arzu edildiği değişik endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptirler [5,6].

Bu çalışmada farklı oksit seramik kaplamların ve oksit seramik/teflon tabakalardan oluşan karma kaplamaların kuru kayma koşulundaki aşınma davranışları ayrı ayrı incelenmiştir.

2. SERAMİK KAPLAMALAR

2.1. GİRİŞ

Seramik malzemeler sahip oldukları üstün ısıl, mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri nedeniyle son zamanlarda kritik uygulamalarda tercih edilmektedirler. Ancak üretim maliyetlerinin yüksek oluşu, boyutsal ve biçimsel sınırlamalar bu malzemelerin kullanımlarını kısıtlamaktadır. Seramiklerin diğer malzemelerin üzerine kaplanmasıyla daha düşük maliyetle arzu edilen özelliklere ulaşılabilir [7].

Çeşitli kaplama teknikleriyle V, Ti, Zr, Hf, Nb ve Ta'nın nitrür ve karbonitrürlerini ihtiva eden sert kaplamalar ve çeşitli oksit esaslı seramik kaplamalar metaller üzerine uygulanabilmektedir. Tablo 2.1'de seramik film ve kaplamaların kullanım alanları verilmiştir [8].

En yaygın ve uygulaması en kolay seramik kaplama işlemi toz halindeki seramiğin ısıtılarak altlık yüzeyine püskürtülmesi esasına dayanır. Isıl püskürtme olarak adlandırılan bu yöntemle genel olarak ergiyebilen herhangi bir malzeme püskürtülebilir. Ancak borürler, karbürler ve nitrürler zor eridiklerinden bunların ısıl püskürtmede kullanılması pek mümkün olmaz. Seramik kaplamaların çoğu CVD, PVD, ısıl püskürtme, sol-jel ve HIP yöntemleri ile üretilmektedir [9]. Tablo 2.2 seramik kaplama yöntemlerini ve bu yöntemlerde kullanılan tozları vermektedir.

Tablo 2.1. Seramik film ve kaplamaların kullanım yerleri [8].

KULLANIM AMACI	SERAMİK MALZEME
Aşınmanın azaltılması	Al_2O_3, B_4C, Cr_3C_2, CrB_2, $CrSi_2$, Mo_2C, $MoSi_2$, SiC, TiB_2, TiC, TiN, WC
Sürtünmenin azaltılması	MoS_2, BN, BaF_2/Ca_2
Korozyonun azaltılması	Cr_2O_3, Al_2O_3, Si_3N_4, SiO_2
Isıl koruma	Ca_2Si_4, $MgAl_2O_4$, MgO, ZrO_2
Elektriksel iletkenlik	In_2O_3/SnO_2
Yarı iletkenlik	GaAs, Si
Elektriksel yalıtım	SiO_2
Sensörler	SiO_2, SnO_2, ZrO_2
Optik iletim veya yansıtma	BaF_2/ZnS, CeO_2, CdS, CuO/Cu_2O

Tablo 2.2 Seramik kaplama yöntemleri ve kullanılan seramik tozları.

KAPLAMA TEKNİĞİ	KAPLANAN SERAMİK TOZLAR
CVD	SiO_2, TiSi, SiB, TiN, Si_3N_4
PVD	TiN, TaN, VC, TiC, In_2O_3, Al_2O_3
Plazma Püskürtme	Al_2O_3, Cr_2O_3, ZrN, MoS_2, CaF_2, ZrO_2, TiO_2
Alevle Püskürtme	ZrO_2, Al_2O_3, Cr_3C_2
Patlamalı Tabanca	WC, Cr_3C_2, WTiC, Al_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3
Sol-jel	CeO_2, SiO_2
Sıçratma	TiN, Ta_2O_5, TiO_2, Fe-Cr-P-C, Cr_3B, Ti_3B
HIP	Al_2O_3, ZrO_2, MgO, SiO_2, BeO

2.2. OKSİT SERAMİK KAPLAMALAR

Isıl püskürtme yöntemleriyle üretilen alümina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2) ve kromya (Cr_2O_3) gibi oksit seramik kaplamalar, yüksek aşınma direncinin gerektiği bir çok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadırlar [10]. Bu amaçla kullanılan oksit seramik kaplamalar ve aşınma özellikleri tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Aşınmaya dirençli oksit seramik kaplamalar ve aşınma özellikleri [11].

KAPLAMA MALZEMESİ	ÖZELLİKLERİ
Al_2O_3	Mükemmel elektrik direnci ve düşük sıcaklıklarda aşınmaya dirençli sert ve yoğun kaplamalar.
TiO_2	Aşınmaya ve yüksek sıcaklığa direnç.
Al_2O_3 - TiO_2	Abrasiv, korozif, kavitasyon,oksidasyon ve erozif etkilere karşı direnç.
Cr_2O_3	Korozyona, oksidasyona, abrasiv aşınmaya dirençli düzgün yüzeyli ve sert kaplamalar.
$MgZrO_3$	Ergimiş metal erozyonuna, termal şoklara ve yüksek sıcaklıklardaki abrasiv aşınmaya karşı yüksek direnç.

2.2.1. Alümina Kaplamalar

Alümina genişleyebilen bir seramik olarak bilinir. Sert bir refrakter malzeme ve korozyona dayanıklı iyi bir izolatördür. Üstelik bolca bulunan bir hammaddedir. Alümina kaplamaları üretmek için kullanılan başlıca ısıl püskürtme yöntemleri patlamalı tabanca, alevle püskürtme ve plazma püskürtmedir. Kaplama işlemi sırasında alümina çok hızlı soğuduğundan yarı kararlı γ fazı oluşur. γ alümina, α fazından daha düşük sertliğe sahiptir. Ayrıca 1100 ^oC civarında meydana gelen bu

faz dönüşümü kafes boyutunun değişmesine ve bu suretle kaplamanın çatlamasına sebep olur.

Plazma püskürtme alümina kaplamalar yüksek sertlikleri ve iyi bir elektrik yalıtkanı olmaları sebebiyle otomotiv endüstrisinde metal altlıkları izole etmek için kullanılmaktadırlar. Bu kaplamalar üzerinde daha sonra elektronik devreler imal edilmektedir. Alümina kaplamalar elektrik yalıtımı sağlamak ve aşınmaya dirençli bir yüzey oluşturmak üzere bilgisayar hafıza disklerinde de kullanılmaktadırlar [12].

Alümina çoğu zaman titanya (TiO_2) ile birlikte kullanılır. TiO_2 miktarı arttıkça kaplamanın kırılma tokluğu artar ancak sertliği ve beraberinde aşınma direnci düşer. Bu sebeple düşük titanya miktarı tercih edilir. Örneğin gri alümina olarak adlandırılan $97Al_2O_3$-$3TiO_2$ kaplamalar santrifüj pompaların pistonlarını aşınmadan, oyuklanma erozyonundan ve korozyondan korumak için kullanılırlar. Bu tip kaplamalar çok yoğundurlar ve püskürtülmüş haldeki en pürüzsüz yüzeyi verirler. Bu sayede taşlama ve parlatma gereksinimleri azalır [12].

2.2.2. Krom Oksit Kaplamalar

Krom oksit yeşil renkli bir oksit olup bu nevi kaplamalar aşınma direncinin yanı sıra korozyon direncinin de gerekli olduğu hallerde tercih edilirler. Krom oksit kaplamalar çoğu metal yüzeyine çok iyi bağlanabilirler ve 2300 $HV_{0,05}$ gibi çok yüksek sertlik değerlerine sahip olabilirler. Kimya endüstrisinde hareketli elemanların mafsallarının kaplanmasında, su pompalarında, cevher ayrıştıran çelik makaralarda ve matbaa makaralarının pürüzsüz üst yüzey kaplamalarında kullanılırlar. Krom oksit kaplamalar özellikle gemi ve jeneratör dizel motorlarında kullanılırlar. Bu motorlarda ucuz fakat düşük kaliteli dizel yakıtın kullanımı korozif bir ortam yaratır. Kalitesiz yakıttaki sülfür, vanadyum, sodyum, v.s. gibi gayri safiyetsizlikler ağır korozyon oluşumuna sebep olurlar. Krom oksit kaplamalar dizel motorun sübap gövdelerini aşınma ve korozyondan korumak için gereklidirler. Bu tip kaplamaların kırılma tokluğunu arttırmak ve iyi bağlanma sağlamak üzere optimize edilmeleri gerekir. Yüksek hızlı oksi-yakıt püskürtme (HVOF) yöntemiyle yüksek kalitede kaplamalar elde edilir. Bu durumda 2000 HV sertliğinde ve %1'den az gözenekliliğe sahip kaplamalar üretilebilir [12].

2.2.3. Zirkonya Kaplamalar

Zirkonya (ZrO_2) üstün özellikleri olan bir malzemedir. Düşük ısıl iletkenliği, iyi korozyon direnci ve yüksek kırılma tokluğu sayesinde özellikle saldırgan ortamlarda ısıl koruyucu olarak (thermal barrier) ve aşınmaya dirençli malzeme olarak kullanılmaktadır [13]. Bir diğer önemli kullanım alanı da lambda probu olarak bilinen katı iyonik iletken malzemelerdir. Bu aygıt, içten yanmalı bir motorun egzoz gazındaki oksijen miktarını ölçer ve ideal yakıt-hava karışımını sağlamak üzere karbüratöre verilen yakıt miktarını ayarlar. Böylece yakıt tasarrufu sağlanmasının yanında çevre kirliliği de azaltılmış olur [12].

Zirkonya, ısıl püskürtme yöntemlerinin tamamıyla metal yüzeylere kaplanabilir. Bu kaplamaların yoğunlukları, ihtiva ettikleri gözeneklerden dolayı düşük olur [8]. Püskürtme teknikleriyle üretilen zirkonya kaplamalar 1975 yılından itibaren gittikçe önem kazanmıştır. Zirkonyanın ergime noktası çok yüksek (2710 ^oC) olduğundan ve plazma yöntemleri iyi gelişmemiş olduğundan bu tarihten önce bu malzemenin kaplanması pek mümkün olmuyordu.

Zirkonya monoklinik, tetragonal ve kübik olmak üzere üç farklı kristal yapıya sahiptir. Zirkonya 1170 ^oC' nin altında monoklinik yapıda bulunur. Bu sıcaklığın üzerinde monoklinik yapı tetragonal yapıya dönüşür. Tetragonal yapı da 2370 ^oC ye kadar kararlıdır. Bu sıcaklığın üzerinde ise kübik yapı meydana gelir. Monoklinik yapıdan tetragonal yapıya geçiş sırasında hacim %8 oranında artar. Bunun sonucunda malzeme parçalanır. Bu durum zirkonyalı seramiklerin kullanımında büyük problemler ortaya çıkarır. Bunun önüne geçebilmek için zirkonyaya CaO, MgO, Y_2O_3 gibi toprak alkali ve nadir elementlerin oksitleri katılır. Böylece zirkonya oda sıcaklığında kararlı hale gelmiş olur. Buna tamamen stabilize edilmiş zirkonya denir. Bu şekilde tam olarak stabilize edilmiş zirkonyanın mekanik özellikleri zayıftır. Bu yüzden tamamen kararlı kübik yapı yerine, içerisinde çökelti halinde monoklinik veya tetragonal faz içeren kısmen stabilize edilmiş zirkonya tercih edilmektedir [14].

3. ISIL PÜSKÜRTME

3.1.GİRİŞ

Isıl püskürtme yöntemleriyle üretilen kaplamalar yarı ergiyik halde yapılan kaplamalar sınıfına girer. Isıl püskürtme terimi toz halindeki kaplama malzemesinin ergitilerek hızla altlık yüzeyine püskürtüldüğü tüm yöntemleri tarif eden genel bir terimdir. Kaplamalar ergiyik damlacıkların soğuk (ortam sıcaklığındaki) altlığa çarpması sonucu ani katılaşmayla oluşur [5].

50 'li yılların sonlarına kadar alevle püskürtme ve elektrik ark tel püskürtme olmak üzere başlıca iki cins ısıl püskürtme yöntemi mevcut idi. Bu kaplamalar başlıca aşınmış parçaların onarımında ve abrasiv, adhesiv aşınmaya dirençli alaşım ve sermetler üzerine oldukça kalın tabakalar uygulamada kullanılırlardı. Bu kaplamaların oksit içerikleri ve gözenekleri oldukça yüksek olmakla beraber bağ mukavemetleri de bir o kadar düşüktü [4].

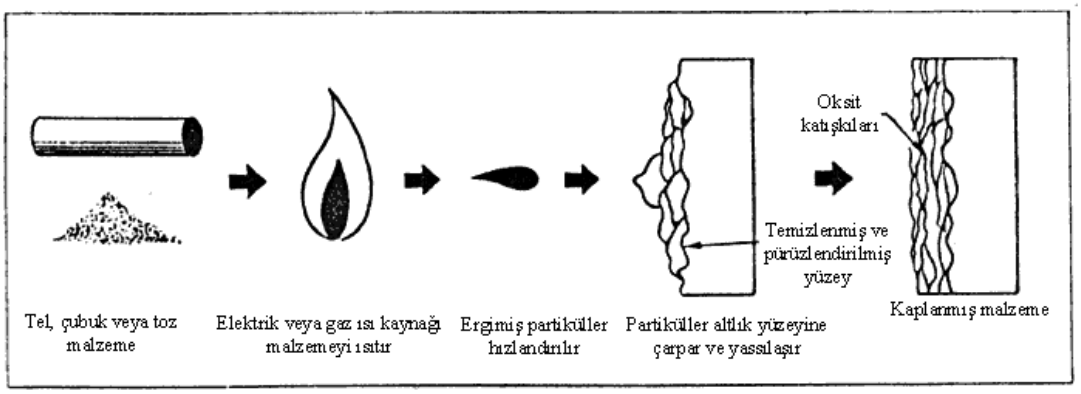
50 'lilerin ortalarında patlamalı tabanca ve plazma ile kaplama yöntemlerinin ortaya çıkışını yüksek hızlı oksi-yakıt kaplama yöntemi izledi. Bu kaplamaların bağ mukavemetleri çok daha yüksekti, gözenek ve oksit seviyeleri daha düşüktü. Bu gelişmeler sayesinde kaplamaların aşınma ve korozyon dirençleri oldukça yükselmişti. Aradan geçen uzun zaman içerisinde bu gelişkin ısıl püskürtme yöntemleri hemen her endüstride bir çok kullanım alanı buldu [4].

3.2. ISIL PÜSKÜRTME İŞLEMİ

Isıl püskürtme işleminde toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesi ergime noktasına yakın sıcaklıklara kadar ısıtılır ve oluşan ergiyik yada yarı ergiyik damlacıklar bir gaz akımında hızlandırılarak kaplanacak yüzeye püskürtülürler (Şekil 3.1). Damlacıklar çarpma sırasında yapraksı partiküllere dönüşürler, katılaşırlarken altlık yüzeyine yada daha önce kaplanmış tabakaya yapışırlar (Şekil 3.2) [15].

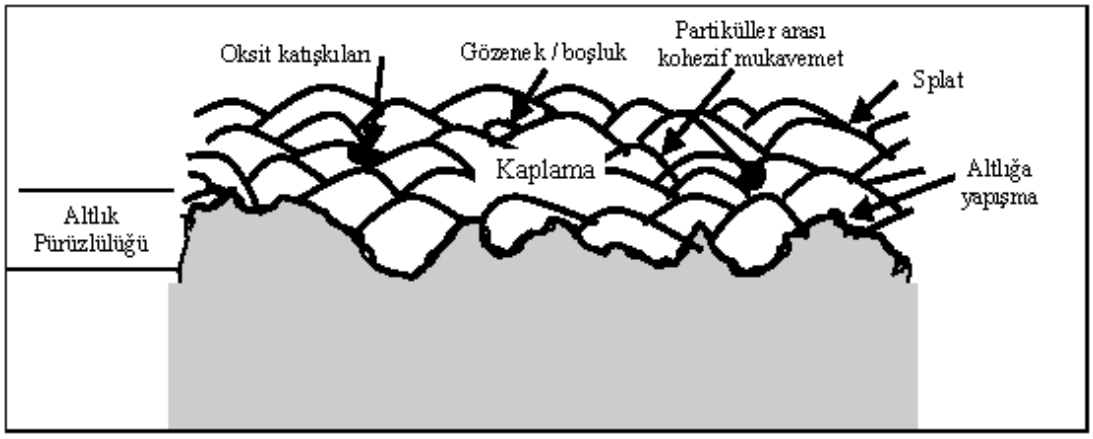
Kaplamanın altlık malzemeye yapışması temelde mekanik kısmen de kimyasal bağlanma ile olmaktadır. Kuvvetli bağlanma sağlamak amacıyla kaplanacak yüzey

önce kimyasal olarak temizlenir daha sonra abrasiv partiküller püskürtülerek pürüzlendirilir. Partiküller pürüzlü yüzeyin hem oyuklarına girerek hem de yüzey pikleri üzerinde büzüşerek katılaşırlar ve kaplamanın daha kuvvetli bir şekilde bağlanmasını sağlarlar [16].



Şekil 3.1. Isıl püskürtme ile kaplama işleminin şematik gösterimi [17].

Isıl püskürtme ile kaplama işlemi esnasında altlık malzemede genellikle önemli bir ısınma meydana gelmez. Bu sayede, işlenmiş ve ısıl işlem görmüş metalik parçalar çarpılma meydana gelmeden, mikroyapı ve özellikleri değişmeden kaplanabilir. Bunların yanı sıra yöntemin en büyük dezavantajı sadece kaplama tabancası tarafından görülebilen yüzeylerin kaplanabilmesidir. Ayrıca kaplama özellikleri püskürtme açısına bağlı olarak değişir [15].



Şekil 3.2. Isıl püskürtülmüş kaplamanın şematik kesit görüntüsü [15].

3.3. KAPLAMA MALZEMELERİ

Düşük ergime sıcaklığına sahip metaller, seramikler, refrakter karakterli metaller, camsı metaller, polimerler ve bu malzemelerin kombinasyonları başta olmak üzere sıvı halde kararlı olan tüm malzemeler ısıl püskürtme yöntemlerinden en az biri ile kaplama oluşturmak üzere kullanılabilmektedir [12,18].

3.4. UYGULAMA ALANLARI

Isıl püskürtülmüş kaplamalar genellikle metalik altlıklara uygulansa da bazen karbon-karbon, karbon-epoksi ve diğer polimerik veya metalik matriksli kompozitlere de uygulanır. Isıl püskürtülen kaplamaların çok geniş bir kullanım alanı vardır. Aşınma ve korozyon direnci temini başta olmak üzere boyutsal tamirat, ısıl koruyucu, ısıl iletken, elektrik iletkeni, elektrik yalıtkanı, radyasyon düzenleyici v.s. olarak kullanılırlar. Havacılık, otomotiv, gemi inşa, zirai alet üretimi, besin işleme, madencilik, metalurji, kimya, matbaa başta olmak üzere hemen her endüstride kullanılırlar [12].

Otomotiv endüstrisinde piston segmanları, piston, valf, disk v.b. parçaların ısıl püskürtme ile kaplanması standart bir uygulama halindedir. Deniz taşıtlarında şaftlar, turbo motorlar, pervaneler, bu tür kaplamalar için uygulama alanı oluşturmaktadır. Yöntemin ne denli yaygın olduğunun belki de en çarpıcı örneği, ortopedik implant malzemelerin aynı teknoloji kullanılarak kaplanmasıdır [19].

3.5. ISIL PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİ

Isıl püskürtme yöntemleri iki ana grup altında incelenmektedir. Birinci grup yanma işlemi olarak adlandırılır ve bir hidrokarbon yakıt (asetilen, propan, hidrojen vb.) ile oksijenin (veya havanın), kaplama malzemesinin ergitilip altlık malzeme üzerine püskürtülmesi için gerekli entalpi ve kinetik enerjiyi sağlaması için yanması esasına dayanmaktadır. İkinci grupta ise elektrik gücü toz partiküllerini püskürtmek için kullanılan enerjinin kaynağı olmaktadır. Alevle püskürtme, elektrik ark ile püskürtme, çeşitli yüksek hızlı oksi-yakıt teknikleri ve patlamalı tabanca tekniği gibi çeşitli yöntemler (Tablo 3.1) yukarıda belirtilen gruplara örnek olarak verilebilir.

Alev, elektrik ark, patlamalı tabanca ve plazma püskürtme yöntemleri ticari olarak kullanılan en önemli ısıl püskürtme yöntemleridir (Tablo 3.1). Bu yöntemler ile tel veya çubuk ve toz biçimindeki malzemeler püskürtülebilir [15].

Isıl püskürtme yöntemleri ile oluşturulan kaplamaların yoğunluğu partiküllerin sıcaklığına ve altlık yüzeyine çarpma hızına bağlıdır. Isıl püskürtme yöntemlerinde sıcaklıklar 2500-15000 ^{o}C arasında, partikül hızları ise 30-40 m.s^{-1}e kadar değişen aralıklarda olmaktadır. Partiküllerin sahip olduğu sıcaklık ve hızlar ne kadar yüksek olursa, oluşturulan kaplamaların yoğunluğu da o kadar yüksek olmaktadır. Bir çelik üzerine plazma ile püskürtülmüş nikel-alüminyum bağ tabakası, alevle püskürtülmüş nikel-alüminyum bağ tabakasından yaklaşık olarak üç kat fazla bağ mukavemeti verebilmektedir. Çünkü plazma tabancasıyla üretilen partiküllerin hız ve sıcaklık değerleri alevle üretileninkinden çok daha yüksektir [17].

3.5.1. Alevle Püskürtme

Alevle püskürtme yöntemi ısıl püskürtme yöntemlerinin en eskisi olup günümüzde de en çok kullanılanıdır. Yöntem ilk kez 20. yy.ın başlarında Dr. Schoop tarafından kullanılmıştır [15].

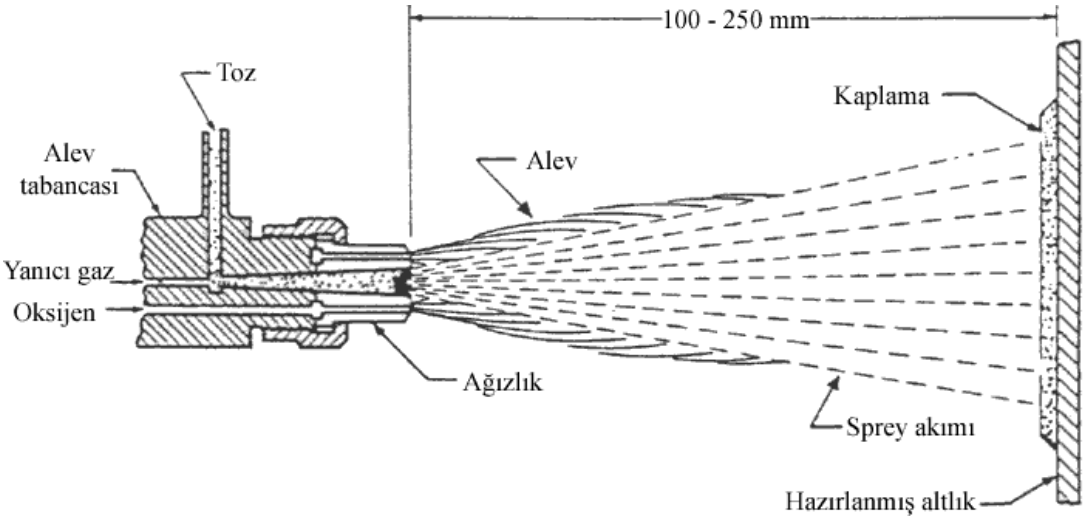
Alev ile püskürtme tabancaları çubuk, tel veya toz biçimindeki kaplama malzemelerini püskürtür. Bu yöntemde kaplama malzemesini eritmek için ısı kaynağı olarak yanıcı gazlar kullanılır. Genellikle oksijen-asetilen (O_2-C_2H_2) ve oksijen-hidrojen (O_2-H_2) gaz karışımları kullanılır. Asetilen en yüksek alev sıcaklığını (3087 ^{o}C) sağlamanın yanı sıra fiyatının makul oluşu, kolay bulunabilmesi ve bir çok kaplama malzemesiyle kimyasal bakımdan uyumlu olması gibi bir çok avantaja sahiptir. Bu sebeplerle en sık kullanılan yanıcı gaz asetilendir. Ancak düşük ergime sıcaklığına sahip kaplama malzemelerinin püskürtülmesinde bazen propan ve ince tozların püskürtülmesinde de hidrojen kullanılmaktadır. Bugün propilen, metilasetilen-propilen propadien gibi daha ucuz ve daha güvenli alternatif gazlar konusundaki çalışmalar devam etmektedir [15].

Tablo 3.1 Ticari ısıl püskürtme yöntemlerine ait bazı önemli özellikler [20].

Kaplama Yöntemi	**Isı Kaynağı**	**Sevk edici**	**Beslenen Malzeme**	**Tabanca Sıcaklığı (^oC)**	**Partikül Hızı (ms^{-1})**	**Kaplama Malzemesi Türü**	**Kaplama Gözenekliliği (%)**	**Nispi Bağ Mukavemeti**
Alevle Püskürtme	Oksi-asetilen/ oksi-hidrojen	Hava	Tel Toz	3300	240 30-120	Metalik Metalik/Seramik	8 - 15 10 - 20	İyi
Plazma Püskürtme	Plazma arkı	Yansız Gaz	Toz	16000	120 - 450	Metalik/Seramik/ Plastik ve Karışımları	2 - 5	İyi - Mükemmel
Patlamalı Tabanca	Oksijen/ asetilen/ gaz patlaması	Patlama şok dalgaları	Toz	4500	800	Metalik/ Seramik ve Karışımları	0.1 – 1	Mükemmel
Elektrik Ark Püskürtme	Elektrotlar arasındaki ark	Hava	Tel	6000	240	Nispeten sünek malzemeler	8-15	İyi

Alevle püskürtülerek üretilen kaplamalar 50 μm'den birkaç mm'ye kadar değişen kalınlıklarda olabilmektedirler. Nihai kaplama kalınlığı genellikle birkaç pasoda elde edilir. Alevle püskürtmeden önce iş parçası, yüzeyindeki nemin dışarı atılması için ön ısıtmaya tabi tutulur. Bu işlem alev tabancasının iş parçası yüzeyinde gezdirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem ile üretilen kaplamalar nispeten gözenekli yapıya sahiptir [9,17].

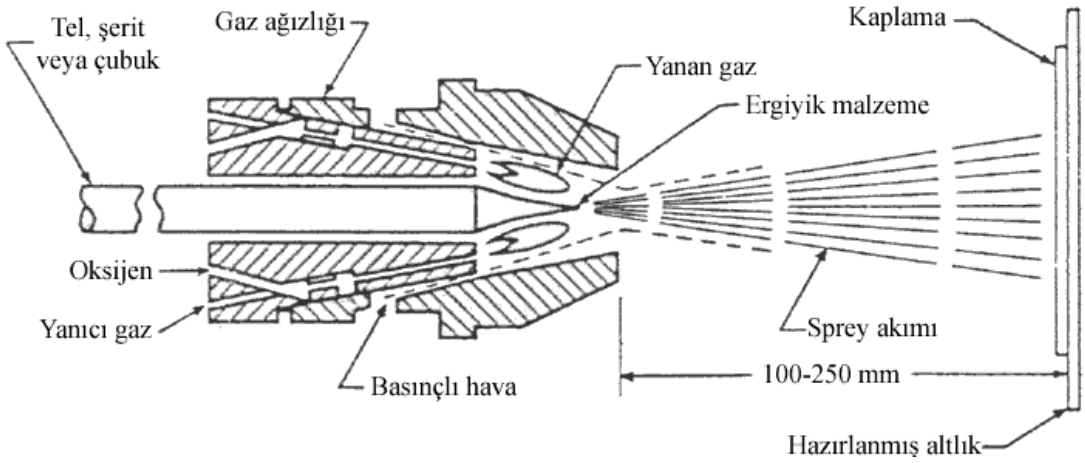
Alevle püskürtme yöntemlerinin en basiti toz püskürtmedir (Şekil 3.3). Yöntemde toz malzeme alev tabancasının üzerindeki bir besleyiciden yerçekiminin etkisiyle beslenmekte ve bir taşıyıcı gazın yardımı ile toplanıp ergitilmek üzere tabancanın ağızlığına taşınmaktadır. Burada ergitilen tozlar kaplamayı oluşturmak üzere altlık malzeme üzerine püskürtülmektedir. Bu işlem daha ziyade seramik tozları için uygulansa da, oksidasyona dirençli metal ve alaşımlar da bu yöntem ile püskürtülebilmektedir. Alümina, zirkonya, alümina-titanya, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar gibi malzemeler bu yöntem ile yaygın olarak püskürtülmektedirler. Aynı tür tozların kullanıldığı plazma püskürtme işlemine göre yatırım ve işletme maliyeti daha az olmakla birlikte toz alev püskürtme işleminin uygulanabildiği altlık malzemeler sınırlıdır [20].



Şekil 3.3. Alevle toz püskürtme işleminin şematik görünümü [15].

Tel alev püskürtme işlemi ile tel halinde çekilebilen ve yanma alevi içerisinde ergiyebilen tüm metaller püskürtülebilmektedir. Yöntemde metalik tel, hızı ayarlanabilir bir motor vasıtasıyla uçlarının ergitildiği bir ağızlık içerisine sürekli olarak beslenmektedir (Şekil 3.4). Aynı zamanda ağızlığın dış kısmından da sürekli olarak basınçlı hava beslenmektedir. Tel ucu sürekli olarak ergime noktasına

ısıtılmakta ve oluşan sıvı damlacıklar basınçlı hava yardımı ile partiküller halinde ayrıştırılıp iş parçası üzerine püskürtülmektedir. Alüminyum, bakır, nikel, çinko, bronz, çelik ve molibden gibi malzemeler bu yöntem ile püskürtülebilmektedir. Bu yöntem ile yer yer % 5-15 gözeneklilikte kaplamalar üretilebilmektedir [20].

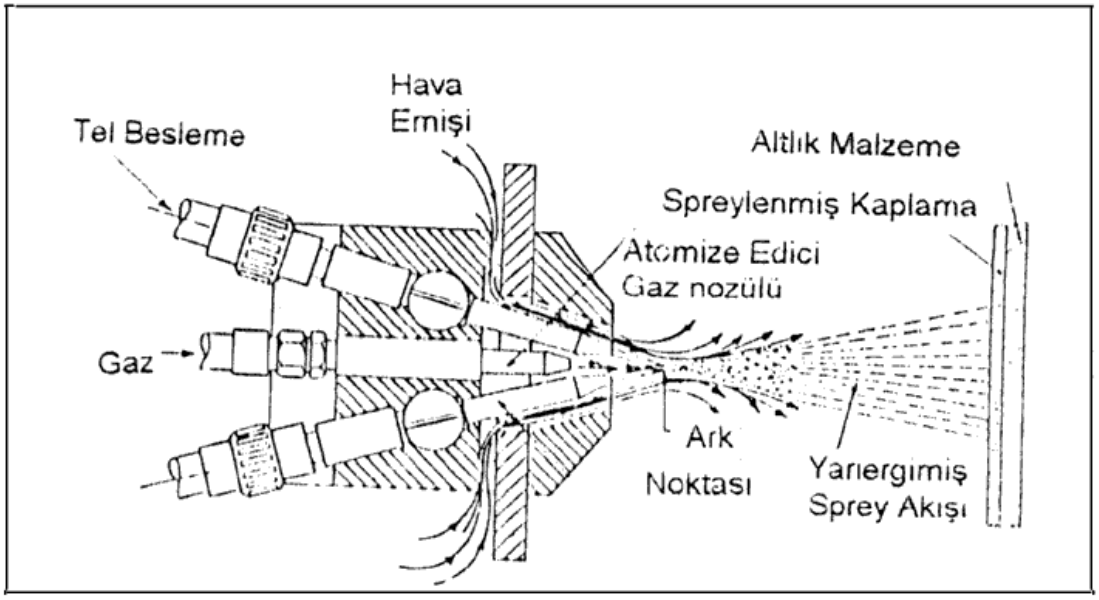


Şekil 3.4. Alev ile tel, çubuk, şerit püskürtme işleminin şematik görünümü [15].

Çubuklu alev püskürtme sistemi tozlu sistemden daha iyidir. Zira malzeme ergitildiği taktirde kaplanacak yüzeye püskürtülmüş olur. Halbuki tozlu sistemde tam ergimeyen taneciklerde püskürtülebilmektedir. Bunun yanı sıra çubuklu sistemde kullanılmak üzere seramik çubuklar üretmek güçtür.

3.5.2. Elektrik Ark Püskürtme

Bu yöntemde benzer yada benzer olmayan iki tel elektrot arasında sürekli bir ark oluşturulmakta ve oluşan ark telleri ergitmektedir. Ergitilen tel uçları hızlı ve soğuk hava jeti tarafından atomize edilmekte ve daha sonra kaplamayı oluşturmak üzere iş parçası üzerine gönderilmektedir (Şekil 3.5) [16]. Bu yöntem ile yüksek dolgu oranları elde edilebilir ve otomatik sistemlere uyarlanması da kolaydır. İşlem özellikle büyük malzemeler üzerine kalın kaplamaların yüksek hızlarda çökeltilmesi için uygundur. Tel ergime veriminin çok yüksek hızlarda gerçekleşmesi, işlemde yüksek çökelme hızlarının elde edilmesine imkan tanımaktadır.

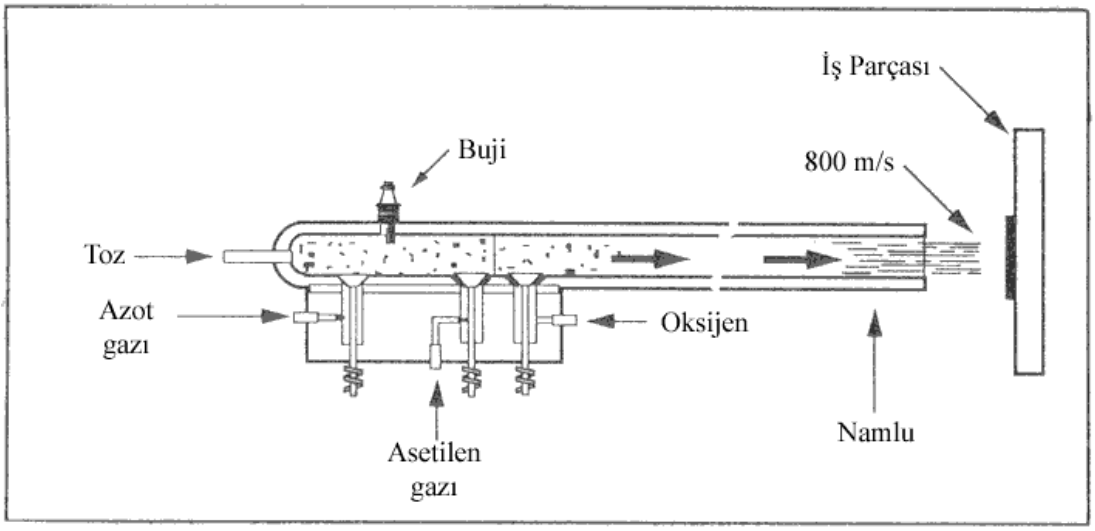


Şekil 3.5. Elektrik ark püskürtme işleminin şematik görünümü [20].

Elektrik ark ile üretilen kaplamalar alevle püskürtme ile üretilenlerle kıyaslandığında daha yüksek bağ mukavemeti, daha yüksek çökelme hızı, kaplamadaki oksit miktarının azaltılabilmesi ve kaplamanın maliyetinin daha düşük oluşu gibi çeşitli üstünlüklere sahiptirler [16]. Alev ile püskürtme işlemine göre işlem sıcaklığı daha yüksek olmasına rağmen, tellerin ucundaki ergiyen damlaları ayırmak için basınçlı soğuk hava kullanıldığından kaplanan parça üzerindeki ısı girdisi çok düşüktür, bu durum ısıya karşı hassas olan malzemeler için bir avantaj olmaktadır. Ancak yöntem, elektriksel olarak iletken ve tel haline getirilebilen malzemelerin püskürtülmesiyle sınırlıdır, dolayısıyla karbürler, nitrürler ve oksitler püskürtülemez [21].

3.5.3. Patlamalı Tabanca İle Püskürtme

Patlamalı yöntemde belirli miktarlarda oksijen ve asetilen sübaplar yardımı ile yanma odası içerisine beslenmektedir. Taşıyıcı azot gazı içerisindeki toz malzeme hassas bir şekilde yanma odasına püskürtülmektedir (Şekil 3.6). Tüm sübaplar kapandığı zaman gaz karışımı bir ateşleme bujisi ile ateşlenerek tutuşturulmaktadır. Ateşlemeyi müteakiben birkaç mili saniye içerisinde oluşan patlama ve şok dalgaları, toz partiküllerini ergime noktasına yakın sıcaklıklara ısıtmakta ve yaklaşık olarak 800 ms^{-1} 'lik hızlarda altlık malzeme üzerine püskürtmektedir. Bu işlem tekrarlı olarak saniyede birkaç kez gerçekleşmektedir [22,23].



Şekil 3.6. Patlamalı tabanca ile püskürtme işleminin şematik görünümü [4].

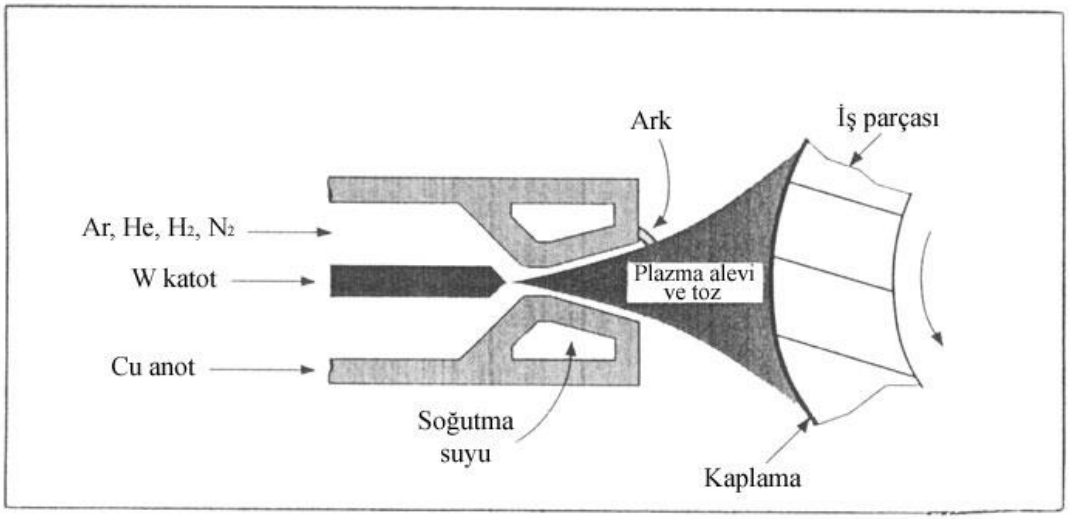
Sistemde kullanılan namlu her patlama sonrası nitrojen gazı ile temizlenmektedir. Namlunun çapı yaklaşık 25.4 mm 'dir ve her patlama sonrasında yaklaşık 25 mm çapında birkaç mikron kalınlığında kaplama tabakaları oluşur. Titiz bir püskürtme sonrası düzenli kalınlıkta ve yapıda kaplamalar elde edilebilir. Bu yöntemle hemen hemen bütün metalik, seramik ve sermet malzemeler püskürtülebilmektedir [4].

Yöntemde alev sıcaklığı yaklaşık 3000 ^{o}C, esas malzemenin sıcaklığı ise CO_2 soğutma sistemi yardımıyla 150 ^{o}C 'nin altında olup ergiyik damlaların hızı 800 ms^{-1} 'dir. Yüksek hızlı damlalar esas metal üzerinde boşluk seviyesi düşük (%0.5-1) ve iyi bağlanmış kaplamalar meydana getirir. Yöntem çok gürültülü olup ses şiddeti 150 dB'den fazladır. Bu yüzden işlem ses izolasyonlu bir odada yapılmakta ve operatör tarafından uzaktan kontrol edilmektedir [21].

Yakıt karışımının değiştirilmesiyle partikül hızları 1000 ms^{-1} 'i aşmaktadır. Süper Patlamalı Yöntem olarak adlandırılan bu yeni yöntemle, klasik patlamalı yöntemlerdekine göre daha yüksek yoğunluklu ve daha yüksek bağ mukavemetli kaplamalar üretilmektedir. Ayrıca daha yüksek partikül hızlarından dolayı, oluşan kaplamalar önemli miktarda kalıntı basma gerilmeleri içerirler. Diğer taraftan çoğu ısıl püskürtme yöntemiyle oluşturulan kaplamalarda kalıntı çekme gerilmeleri söz konusudur [4].

3.5.4. Plazma İle Püskürtme

Yöntemde tungsten katot ve su soğutmalı bakır anot arasında elektrik arkı oluşturulur. Bu ark soy gazı iyonize ederek plazma haline dönüştürür. Toz halindeki kaplama malzemesi yüksek sıcaklıktaki ve yüksek hızdaki gaz plazmanın içerisine enjekte edilir. Böylece toz ergir ve kaplanacak yüzeye yüksek bir hızla püskürtülür (Şekil 3.7) [4].



Şekil 3.7. Plazma püskürtme ile kaplamanın şematik görünümü [4].

Soy gaz olarak genellikle argon kullanılmakla birlikte gazın ısıl özelliklerini arttırmak için kimi zaman hidrojen, nitrojen yada helyum ilave edilmektedir. Gazın hızı tabanca dizaynına, toz miktarına ve akış hızına bağlıdır ve süpersonik olabilir. Plazmanın çekirdeğindeki sıcaklık 30.000 ^{o}C 'yi aşabilir. Gazın hızı kimi zaman süpersonik olmakla birlikte partiküllerin hızı genellikle 550 ms^{-1} 'i geçmez ve çoğu zaman 300 ms^{-1} civarındadır [4].

Süblimasyon, oksidasyon gibi istenilmeyen yollarla değişikliğe maruz kalmadan ergiyebilen ve uygun bir biçimde (tane şekli, tane boyutu ve dağılımı) toz olarak üretilebilen her malzeme bu yöntemle püskürtülebilir [24]. Günümüzde saf metaller, alaşımlar, seramikler, plastikler, pseudo alaşımlar ve sermetler olarak sınıflandırılan 300 'den fazla farklı malzeme bu yöntemle püskürtülebilmektedir.

4. OKSİT SERAMİK KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARI

R. Gadow ve D. Scherer isimli araştırmacılar yaptıkları bir çalışmada alüminyum altlık üzerine atmosferik plazma püskürtme yöntemiyle oluşturulan alümina ve titanya kaplamalar üzerine teflon kaplayarak, seramik kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün aşınma davranışına olan etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip seramik kaplamalara teflon uygulanmıştır. Bu kaplamaları karşı malzeme olarak 100Cr6 çelik bilye ile pim-disk tarzı aşınma deneyine tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, uyguladıkları teflon tabakasının kalınlığının artmasıyla çelik bilyede meydana gelen aşınma miktarının azaldığını gözlemlemişler. Titanya kaplamanın yüzey pürüzlülüğü arttıkça teflon tabakanın etkin kalma süresi artmış ve böylece sürtünme katsayısı düşük değerlerde seyretme eğilimi göstermiş. Ancak alümina kaplamanın yüzey pürüzlülüğü arttıkça tam tersi bir durum ortaya çıkmış ve alüminanın artan yüzey pürüzlülüğü ile teflon tabakanın etkisi azalmış. Bu yüzden sürtünme katsayısı daha kısa zamanda artma eğilimi göstermiş. Araştırmacılar bu durumu şöyle açıklamışlar : Pürüzlü yüzeyler, hesaplanan Hertzian basıncından çok daha yüksek mikro temas basınçları oluştururlar. Bu yüzden alümina gibi çok sert bir tabaka, çelik bilye ile temas ettiği zaman yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma meydana gelir. Ancak titanya, alüminadan daha yumuşaktır ve sertliği çelik bilyeninkine yakındır. Titanya pürüzleriyle çelik bilye temas ettiğinde her iki malzemede de mikro-abrazyon meydana gelir. Ayrıca titanya içeren tabakaların mükemmel tribolojik özelliklerinin bir sebebi de Ti_nO_{2n-1} türü Magneli fazları olabilir. Bu faz tabakalı bir yapıya sahip olup, katı yağlayıcı etkisi göstererek kaymayı kolaylaştırır. Ancak alümina, Magneli türü herhangi bir yağlayıcı oksit içermez [1].

Aynı araştırmacılar yaptıkları bir başka çalışmada alüminyum ve magnezyum üzerine doğrudan kapladıkları çeşitli katı yağlayıcı filmlerin, tribolojik özellikleri pek geliştirmediğini tespit etmişler ve sebep olarak zayıf bağlanma ve söz konusu metallerin düşük yük taşıma kapasitesini göstermişlerdir. Ancak önce alümina ve titanya seramik kaplama ve takiben katı yağlayıcı uyguladıklarında kuru kayma koşullarında tribolojik özelliklerde büyük bir iyileşme kaydetmişlerdir [25].

H.J. Kim, C.H. Lee ve Y.G. Kweon yaptıkları ortak çalışmada plazma püskürtme yöntemiyle üretilen Al_2O_3-%13TiO_2 kaplama üzerine uyguladıkları polimer esaslı üç farklı doldurucunun (sealer), kaplamanın mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan mikrosertlik ölçümleri sonucunda, tüm dolduruculaların kaplama sertliğini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca doldurma işleminden önce ve sonra iki elemanlı abrasiv aşınma ve kaplama bağ mukavemeti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dolduruculardan ikisinin bu özellikleri önemli biçimde geliştirdiği gözlenirken üçüncüsünün etkisinin önemsiz olduğu görülmüştür. Ancak aynı çalışmada yapılan üç noktadan eğme deneyi sonuçları, doldurma işlemi sonrasında mukavemetin düştüğünü göstermiştir. Mukavemetteki bu azalma çatlak toklaşma etkisinin azalmasına bağlanmıştır. Doldurulan kaplamadaki çatlak dallanıp budaklanamamakta ve tek başına yayılarak daha tehlikeli olmaktadır [26].

U. Pamuk ve H. Çimenoğlu tarafından yapılan çalışmada paslanmaz çelik ve karbon çeliği üzerine plazma püskürtme yöntemiyle $Al_2O_3TiO_2$ kaplanmış. $Al_2O_3TiO_2$ kaplama uygulanması ile paslanmaz çeliğe göre 3-4.5 katı, karbon çeliğine göre 4.5-6.5 katı aşınma direnci sağlanmış. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve abrasiv partikül boyutunun azalması ile aşınma direncinde artış ve aşınma miktarında azalma kaydedilmiş [27].

Plazma püskürtme yöntemi ile üretilmiş farklı seramik (Al_2O_3-%13TiO_2 , Al_2O_3-%40TiO_2) ve sermet (WC-%17Co) çiftlerinin tribolojik davranışlarını karşılaştırmak üzere V. Fervel ve arkadaşları tarafından bir araştırma yapılmış. Bu çalışma neticesinde seramik-seramik çiftlerinin plastik deformasyona maruz kaldığı ve aşınma hızının nispeten yüksek olduğu ancak WC/Co-seramik çiftinin çok düşük bir hızla aşındığı ortaya koyulmuş. Aşınma direncindeki bu artışa neden olarak WC-Co kaplamanın iyi mekanik özellikleri ve sürtünme sırasındaki bölgesel yüksek sıcaklıklar neticesi yüzeyde oluşan ince WO_3 tabakası ile kaplamadaki grafit gösterilmiştir. Bu bileşikler kuru kayma koşullarında katı yağlayıcı görevi görmektedirler [28].

T.A. Mantyla ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada farklı bileşimlerdeki kaplamaların aşınma davranışlarına seçilen kaplama yönteminin ve kullanılan inorganik doldurucunun etkisini incelemişler. Bu amaçla kauçuk tekerlek abrasiv aşınma (rubber wheel abrasive wear) deneyi (13 N yük, 1 saat deney süresi, 5904 metre toplam mesafe) ve partikül erozif aşınma (her deney için 1 kg 0.1-0.6 mm tane

boyutlarında kuru kuartz kumu, 90^o ve 30^o çarpma açıları, 80 ms^{-1} partikül hızı) deneyi yapılmış. Doldurucu olarak 1:4.2 ağırlık oranında $Al(OH)_3$ ve H_3PO_4 kullanılmış. Bu çalışma göstermiştir ki; yüksek hızlı püskürtme yöntemleriyle (DGS, HPPS ve HVOF) üretilen oksit kaplamalar daha yoğun bir mikroyapıya sahip olmaktalar ve abrasiv ve erozif aşınma dirençleri daha yüksek olmaktadır. Ayrıca doldurma işlemi sayesinde abrasiv ve erozif aşınma direnci önemli ölçüde artmaktadır [6].

L.C. Erickson, H.M. Hawthorne ve T. Troczynski isimli araştırmacılar plazma püskürtülmüş seramik kaplamaların aşınma dirençleri ile mikroyapısal ve mikromekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemek için alümina, alümina-titanya ve kromya kaplamalar kullanmışlar. Neticede en iyi ilişki malzeme sertliği (H), gözeneklilik seviyesi (P) ve abrasiv aşınma hacmi (W) arasında bulunmuş. En iyi sertlik ilişkisi sırasıyla Knoop, çizme ve vikers sertlik ölçümlerinde elde edilmiş. Bu çerçevede $W = k / H^n$ tarzında üssel bir ilişki ortaya çıkmış (k ve n sabit). Elastiklik modülü için de benzer bir ilişki bulunmuş. Kırılma tokluğu ile ilgili olarak $W = k / H^{0.5} K_c^{0.5}$ bağıntısı elde edilmiş [29].

Plazma püskürtme yöntemiyle üretilmiş alümina kaplamanın mikroyapı özelliklerinin aşınma davranışına olan etkisini incelemek üzere K. Furukubo, S. Oki ve S. Godha isimli araştırmacılar bir çalışma yapmışlar. Bu amaçla değişik koşullarda plazma püskürtülmüş alümina kaplamalar blok-halka (block-on-ring) tarzı aşınma deneyine tabi tutulmuşlar. Sonuçta alümina kaplamaların aşınma direncinin kaplama yoğunluğu ve sertliğinden ziyade, partiküller arası kohezif mukavemete bağlı olduğunu ortaya koymuşlar [30].

K. Yamada, H. Nakajima, J. Morimoto, A. Yamaguchi ve Y. Arata yaptıkları çalışmada düşük karbonlu çelik üzerine patlamalı gaz püskürtme yöntemiyle farklı bileşimlerde Al_2O_3 ve CoCrAlY alaşımları kaplamışlar. Kaplamaların aşınma dirençleri jet partikülleri püskürtülerek tespit edilmiş. Bu çalışmada Al_2O_3 'e ilave edilen TiO_2 'nin ve CoCrAlY 'nin kaplama sertliğini ve aşınma direncini düşürdüğü gözlenmiş [31].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. KAPLAMA PROSESİ

Bu çalışmada ticari saflıktaki alüminyum üzerine alevle püskürtme yöntemiyle kaplanmış Cr_2O_3, ZrO_2CaO, Al_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ olmak üzere dört farklı oksit seramik kaplamanın ve bu kaplamaların üzerine daldırma yöntemiyle kaplanan teflon kaplamaların (karma kaplama) yapısal karakterizasyonu yapılmış ve kuru kayma koşulundaki aşınma davranışları incelenmiştir. Kaplamaların alüminyum altlık malzemeye daha iyi tutunmasını sağlamak üzere Ni-Al ara bağlayıcı tozu kullanılmıştır. Kaplama işinde kullanılan seramik tozlarının kimyasal bileşimleri, partikül boyut dağılımları ve morfolojileri Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1. Kullanılan kaplama tozlarının özellikleri [32].

Toz Kodu	Kimyasal Bileşim	Partikül Boyutu (µm)	Toz Morfolojisi
Metco 105NS	98 Al_2O_3	-45+15	Köşeli (ergitilmiş, öğütülmüş)
Metco 130	Al_2O_3-13 TiO_2	-30+5	Kaplı
Metco 136CP	Cr_2O_3-5 SiO_2-3 TiO_2	-90+16	Kaplı
Metco 201NS	ZrO_2-5 CaO-0.5 Al_2O_3- 0.4 SiO_2-1.1 diğer oksitler	-53+11	Köşeli (ergitilmiş, öğütülmüş)

Bu çalışmanın amacına yönelik olarak alevle püskürtme yöntemi özellikle tercih edilmiştir. Bu yöntemle üretilen kaplamların oldukça gözenekli bir yapıya sahip oldukları bilinmektedir. Bu gözeneklerin seramik tabaka üzerine kaplanacak teflon için depo görevini görmesi ve böylece teflonun seramik üzerine daha iyi bağlanması amaçlanmıştır. Teflon kaplama, numunelerin 5 dakika süreyle teflon çözeltisine daldırılması ve ardından 195 ^oC 'de 5 dakika ve takiben 390 ^oC 'de 10 dakika pişirilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir.

5.2. KAPLAMALARIN KARAKTERİZASYONU

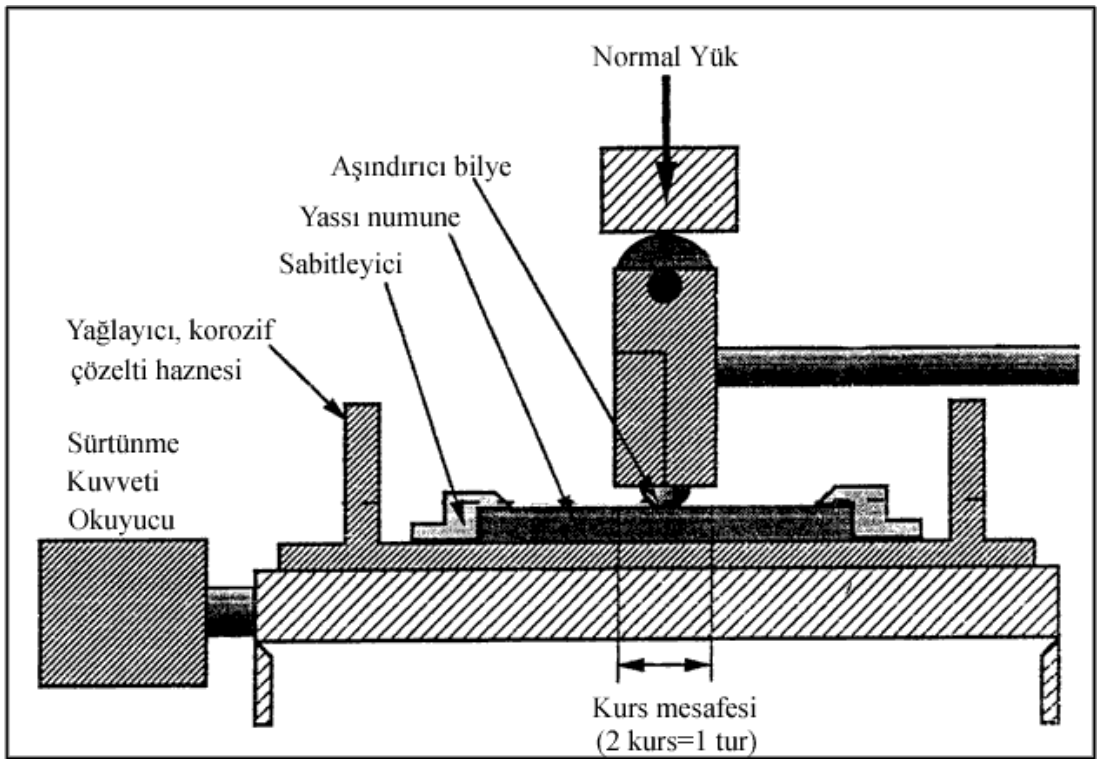
Kaplamaların karakterizasyonu; yüzey pürüzlülüğü ölçümü, X ışınları difraksiyon analizi, metalografik inceleme ve mikrosertlik ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir.

Seramik kaplamaların yüzey pürüzlülükleri PERTHOMETER S8P tipi cihaz kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) cinsinden ölçülmüş olup iki ölçümün ortalaması dikkate alınmıştır. X-ışınları difraksiyon analizi Philiphs PW1820 marka cihazda Cu-Kα radyasyonu ile yapılmıştır. Metalografik incelemeler numunelerin kalınlık kesitinde, numuneler bakalite alındıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bakalite alınan numuneler standart yöntemlerle zımparalanıp parlatılmış, Zeiss marka mikroskopta incelenmiş ve kalınlıkları ölçülmüştür. Kaplamaların sertlikleri metalografik numuneler üzerinde WILSON TUKON marka mikrosertlik cihazında, Knoop ucu kullanılarak 300 g yük ile belirlenmiştir. Sertlik sonuçları 10 ölçümün ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

5.3. AŞINMA DENEYLERİ

Aşınma deneyleri salınım hareketli (reciprocating) aşınma test cihazında (Şekil 5.1) kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sırasında karşı malzeme olarak 10 mm çapında alümina ve çelik bilyeler kullanılmıştır. Deneyler süresince sürtünme kuvveti ve dolayısı ile sürtünme katsayısı sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma deneyleri bittikten sonra ise aşınma izlerinin yüzey profilleri PERTHOMETER S8P tipi cihaz ile dört kademede ölçülmüştür ve yüzey profilleri vasıtasıyla aşınma iz alanları hesaplanmıştır.

Seramik ve karma (seramik + teflon) kaplamalar, aşınma deneyine başlanmadan önce 1200 gritlik SiC zımpara ile hafifçe zımparalanmıştır. Altlık malzeme için böyle bir işlem yapılmamıştır. Aşınma deneyleri 21±2 ^{o}C sıcaklık ve %42±2 nem seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Salınım hareketli aşınma deney cihazının şematik görünümü.

Aşınma deneylerinde kayma hızı 0.02 ms^{-1} olup, toplam kayma mesafesi seramik kaplamalarda 240 m, karma kaplamalarda ise sürtünme katsayılarında belirgin bir artış gözlenene kadar 2400 m ’ye varan daha uzun mesafelerdedir. Seramik kaplamaların aşınma deneyleri 275, 496, 737 ve 930 g. olmak üzere dört ayrı yük altında yapılmıştır. Karma kaplamalar ise 930 ve 1558 g. olmak üzere iki ayrı yük altında deneye tabi tutulmuştur.

Aşınma deneylerinden sonra numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin profili alınarak aşınma alanları hesaplanmıştır. Ayrıca aşınma izleri optik ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

6.1. KAPLAMA KARAKTERİZASYONU SONUÇLARI

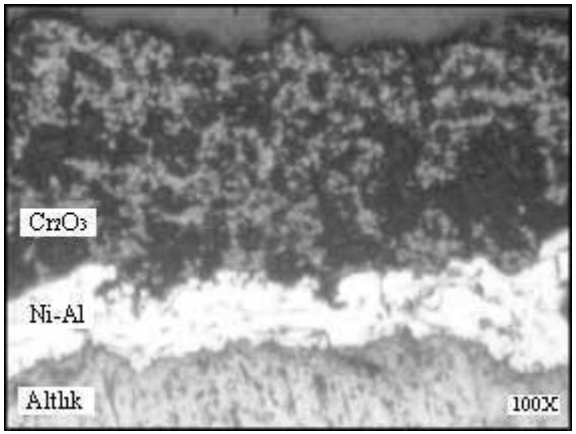
İncelenen seramik kaplamaların ortalama kalınlık, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri Tablo 6.1'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre Cr_2O_3 en sert, Al_2O_3 ise en yumuşak kaplamadır. Ayrıca, kaplama kalınlıklarının birbirine yakın olduğu söylenebilir.

Tablo 6.1. İncelenen seramik kaplamaların bazı özellikleri.

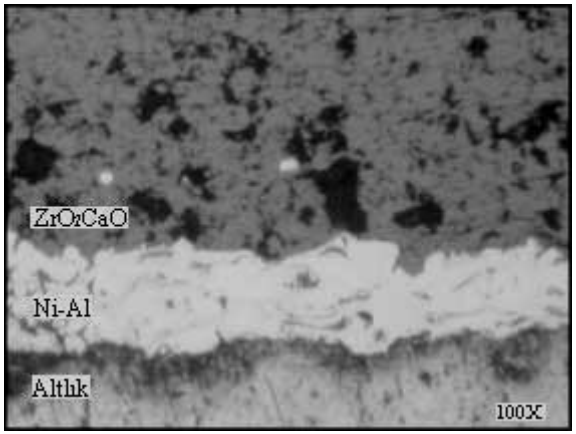
Kaplama	**Sertlik $HK_{0.3}$ (GPa)**	**Ortalama Kalınlık (µm)**	**Yüzey Pürüzlülüğü R_a (µm)**
Cr_2O_3	6.5±0.7	355	3.4
$Al_2O_3TiO_2$	2.6±0.3	315	2.6
ZrO_2CaO	2.0±0.2	335	4.1
Al_2O_3	1.6±0.4	300	8.0

Yapılan X ışını difraksiyonu neticesinde kaplamalarda bulunan fazlar tespit edilmiştir. Alümina kaplamalarda α-Al_2O_3 ve γ- Al_2O_3 fazlarına rastlanırken, ZrO_2CaO kaplamada $CaZrO_3$ fazının yanında az miktarda $CaZr_4O_9$ fazı tespit edilmiştir. Cr_2O_3 kaplamanın ise tek fazlı olduğu ve tamamen Cr_2O_3 fazından teşekkül ettiği gözlenmiştir. $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın Al_2TiO_5 fazından oluştuğu anlaşılmıştır. Kaplamalara ait X ışını diyagramları Ek A 'da verilmiştir.

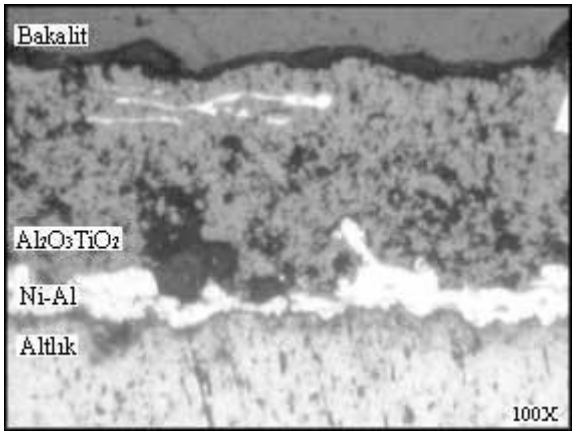
Metalografik çalışma sonrası kaplamaların kalınlık kesitlerinden alınan optik mikroskop fotoğrafları Şekil 6.1 'de verilmiştir. Ayrıca, 50 ve 200 büyütmelerde alınan fotoğraflar Ek B 'de sunulmuştur. Bu resimlerde altlık malzeme, ara bağlayıcı tabaka ve kaplama tabakaları bir arada görülebilmektedir.



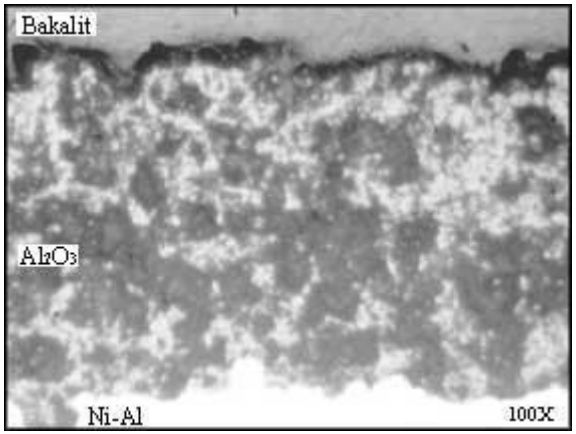
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.1. (a) Cr_2O_3, (b) ZrO_2CaO, (c) $Al_2O_3TiO_2$ ve (d) Al_2O_3 kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri (100X).

6.2. AŞINMA DENEYİ SONUÇLARI

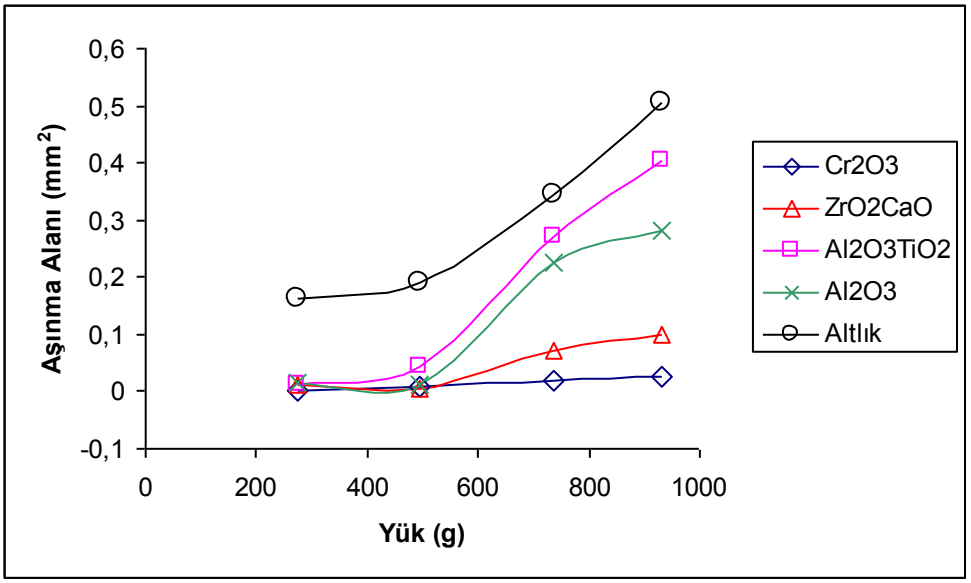
6.2.1. Seramik Kaplamalar

Altlık malzeme ve kaplamaların, Al_2O_3 ve çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma alanı-yük eğrileri Şekil 6.2 'de görülmektedir. Aşınma alanlarının hesaplandığı üç boyutlu yüzey profilleri Ek C 'de verilmiştir. Alüminyumun seramik ile kaplanması aşınmayı azalmıştır. İncelenen kaplamalar içerinde Cr_2O_3 kaplama her iki bilyeye karşı en yüksek aşınma direncini göstermiştir. Karşı malzeme olarak alümina bilyenin kullanıldığı deneylerde Cr_2O_3 ve ZrO_2CaO kaplamalar, her yükte diğer kaplamalara göre üstün aşınma direnci göstermişlerdir. Bu koşullarda kaplamasız altlıkta oluşan aşınma, Cr_2O_3 ile kaplanmış numunede oluşan aşınmanın yaklaşık 18 katı, ZrO_2CaO ile kaplanmış numunenin ise yaklaşık 5 katı kadardır. Al_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ kaplamalar düşük yüklerde yüksek aşınma direnci gösterirken, yüksek yüklerde bu özelliklerini kaybetmişler ve nispeten zayıf aşınma direnci göstermişlerdir (Şekil 6.a).

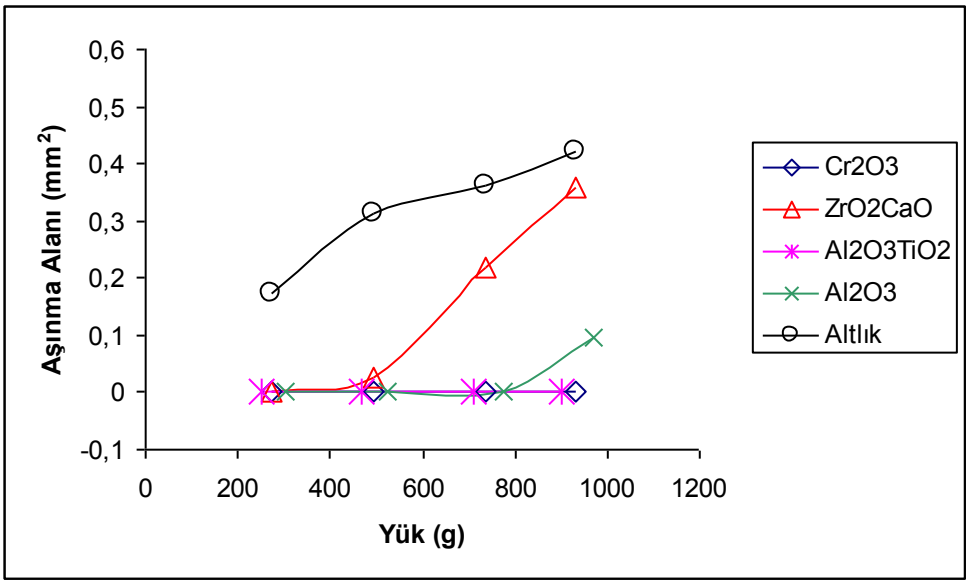
Karşı malzeme olarak çelik bilyenin kullanıldığı aşınma deneylerinde Cr_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ kaplamalarda hiçbir yükte ölçülebilir aşınma iz alanı oluşmamıştır. Dolayısıyla Cr_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ kaplamalar en yüksek aşınma direncini göstermişlerdir. Al_2O_3 kaplama da üstün aşınma direnci sergilemiştir ancak ZrO_2CaO kaplama 496 gramlık yükten sonra hızla aşınmaya başlamış ve nispeten zayıf bir aşınma direnci sergilemiştir (Şekil 6.2.b).

Seramik kaplamaların ve altlık malzemenin 930 g. yük ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobundan (SEM) elde edilen görüntüleri Ek D 'de verilmiştir. Bu resimlerde çelik bilye ile aşındırılan yüzeylerde genellikle pürüzlerin düzeldiği ve önemli bir hasarın oluşmadığı görülmektedir. Ancak çelik bilye ile aşındırılan ZrO_2CaO kaplamada, kaplama partikülleri arasında tabakalaşma mekanizması (splat exfoliation) sonucu ayrılma gözlenmiş ve buna bağlı olarak yüksek aşınma kayıpları oluşmuştur. Bu mekanizmada sürtünme nedeniyle iki partikül arasında oluşan çatlak, çevrimsel yüklemeler sonucu partiküller arasındaki sınır boyunca ilerler ve sonunda tüm bir partikülün yüzeyden kopmasına sebep olur [5]. Çelik bilye ile aşındırılan altlık malzemede ise adhesiv aşınma sonucu karşı malzemeye yapışma olduğu görülmektedir.

Alümina bilye ile aşındırılan yüzeyler nispeten daha kaba bir yüzey görüntüsü sergilemektedirler. Cr_2O_3 kaplamada, çelik bilyeye göre aşınma izi daha belirgindir ve mikroçatlaklar mevcuttur. Al_2O_3 kaplamada görülen beyaz bölgelerin karşı malzemenin yapışması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Altlık malzemede kayma yönüne dik mikroçatlaklar ve yer yer kopmalar tespit edilmiştir.



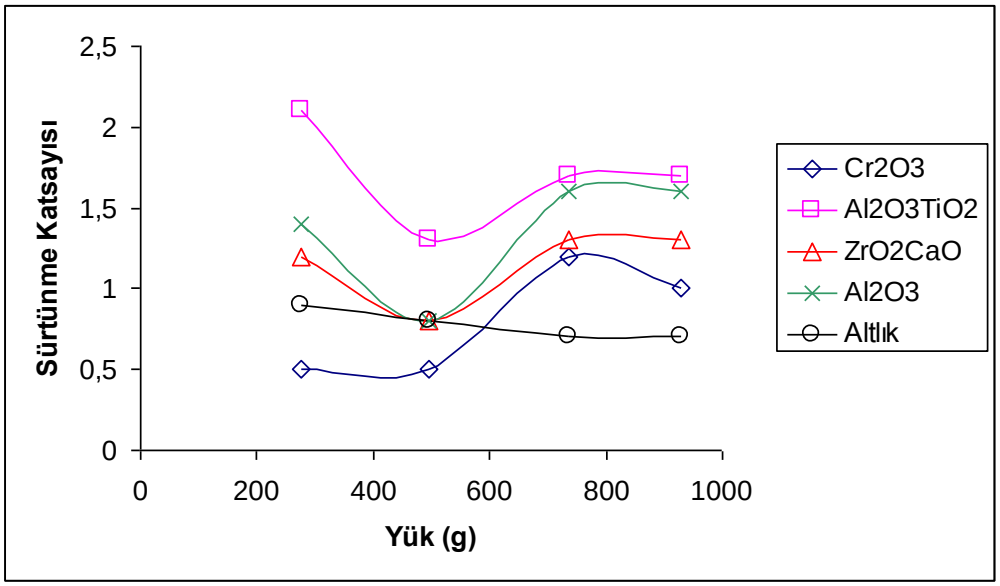
(a)



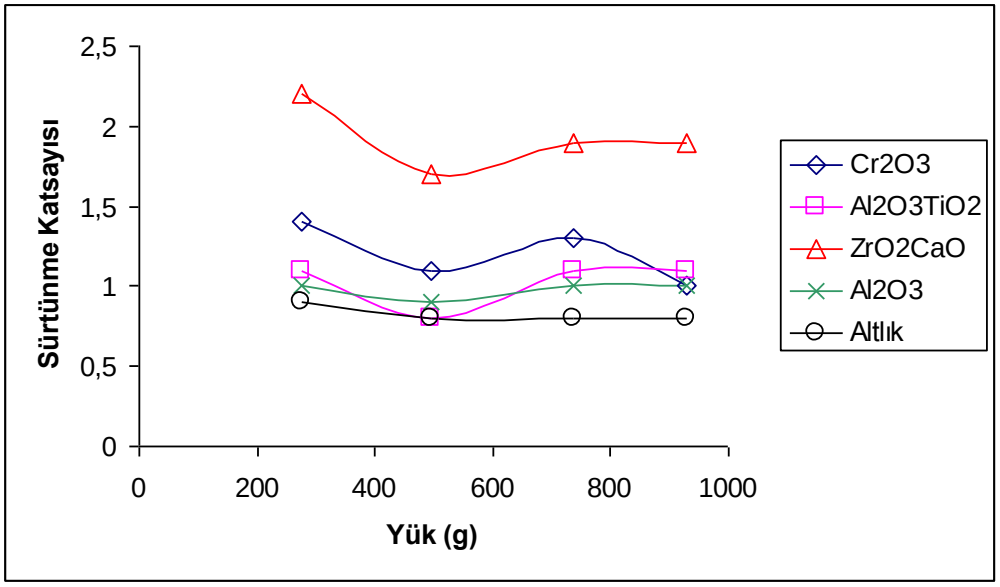
(b)

Şekil 6.2. Altlık malzemede ve seramik kaplamalarda (a) alümina ve (b) çelik bilyelerle gerçekleştirilen aşınma deneylerinde oluşan aşınma iz alanlarının normal yükle olan ilişkileri.

Aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının değişimi Ek.E 'de verilmiştir. Sürtünme katsayısının aşınma deneyleri sırasında kararlı hale geldiği değer, deney yüküne ve test edilen malzemeye bağlı olarak Şekil 6.3'de görülmektedir.



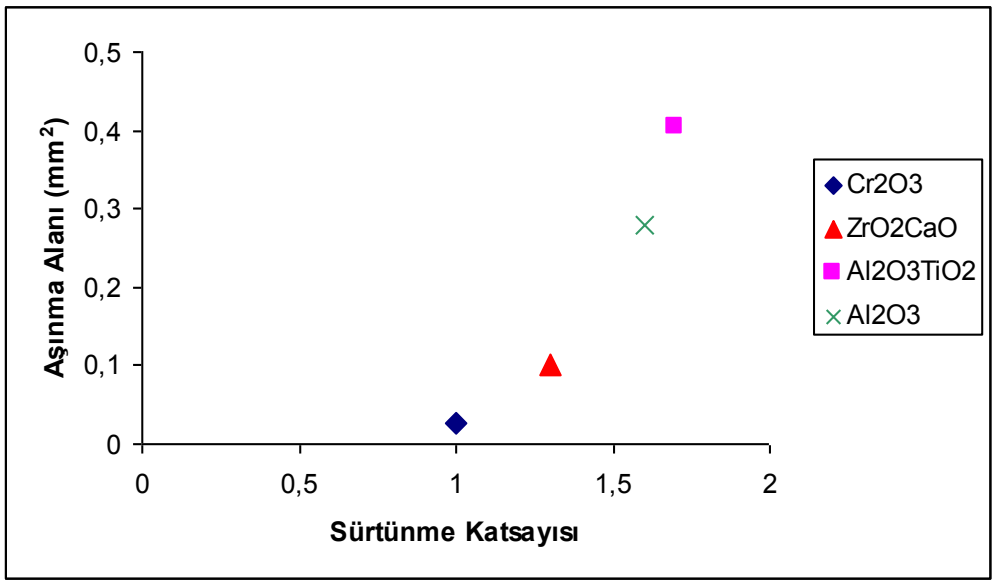
(a)



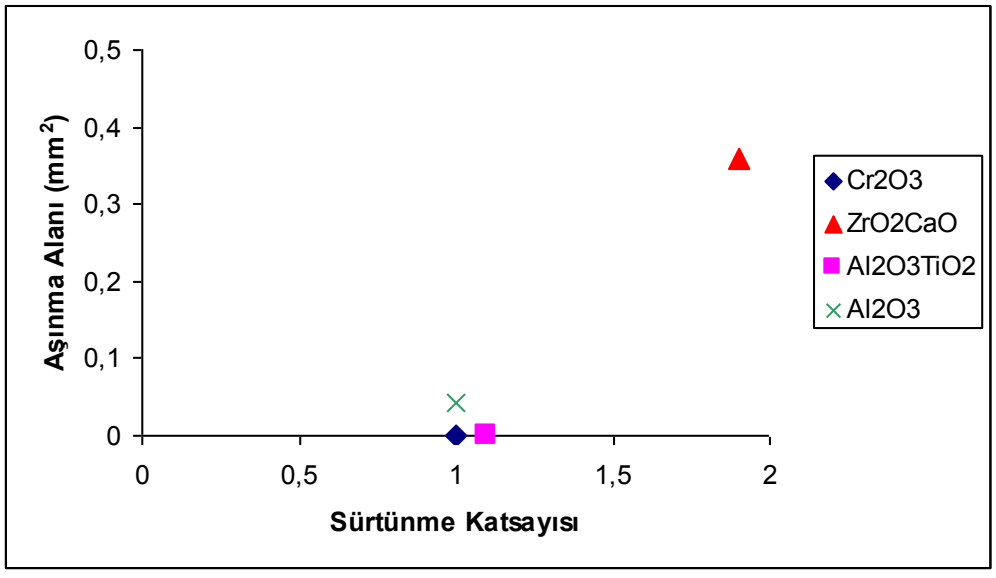
(b)

Şekil 6.3. Altlık malzemenin ve seramik kaplamaların (a) alümina ve (b) çelik bilyelerle gerçekleştirilen aşınma deneylerinde gösterdikleri sürtünme katsayıları ile normal yükün ilişkisi.

Şekil 6.4'de incelenen malzemeler için aşınma iz alanı ile kararlı durum sürtünme katsayısı arasındaki ilişki görülmektedir. Gerek alümina ve gerekse çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri neticesi seramik kaplamalarda oluşan aşınma izi alanları ile sürtünme katsayıları arasında bir paralellik gözlenmiştir. Yani en fazla aşınan kaplama en yüksek sürtünme katsayısını gösterirken, en az aşınan kaplamada en düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir.



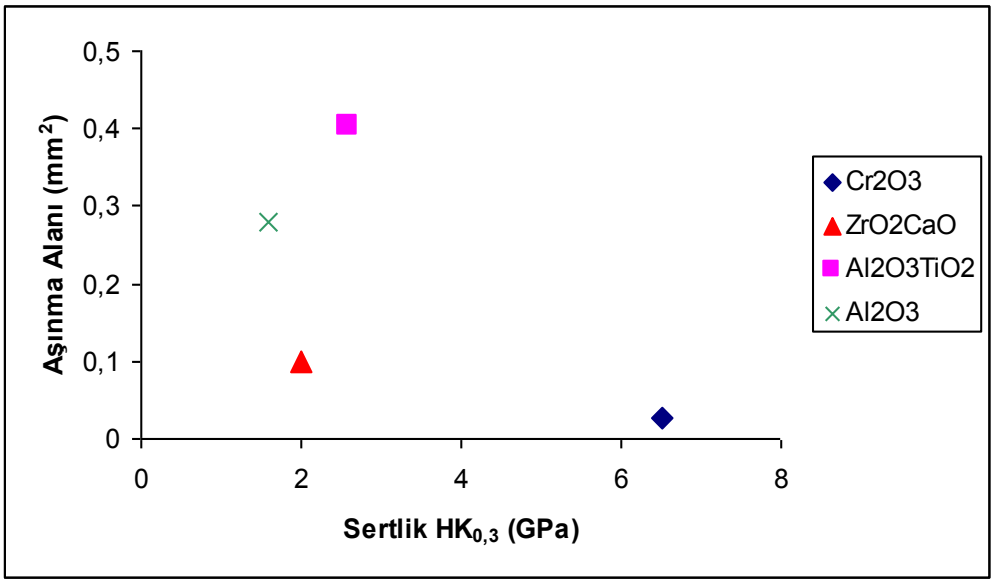
(a)



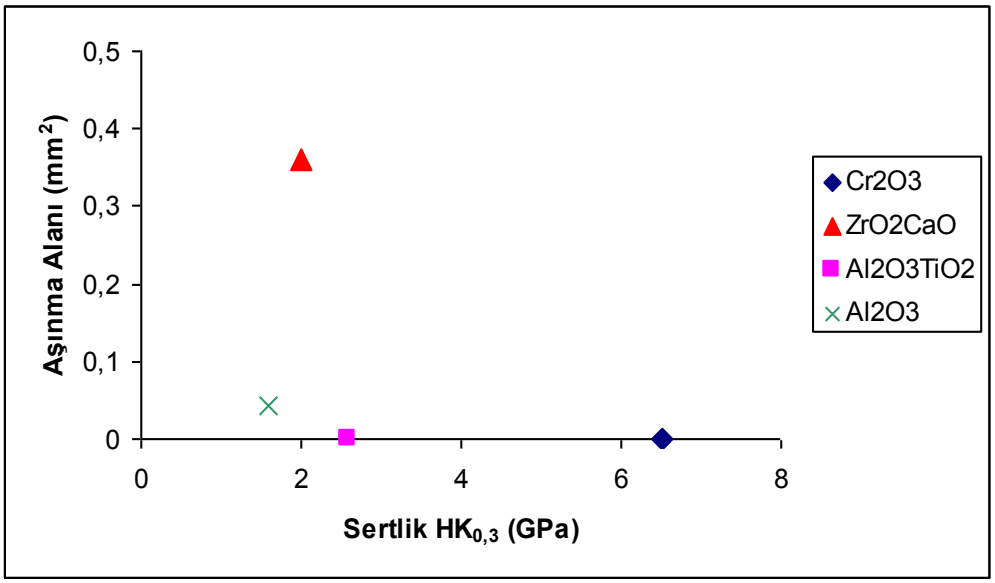
(b)

Şekil 6.4. (a) Alümina ve (b) çelik bilyelerle aşındırılan seramik kaplamaların aşınma iz alanları ile karalı hal sürtünme katsayıları arasındaki ilişki (Yük=930 g).

Kaplamaların sertlik ve aşınma ilişkileri Şekil 6.5 ’de verilmektedir. Genelde sertlik arttıkça aşınmanın azaldığı söylenebilir.



(a)

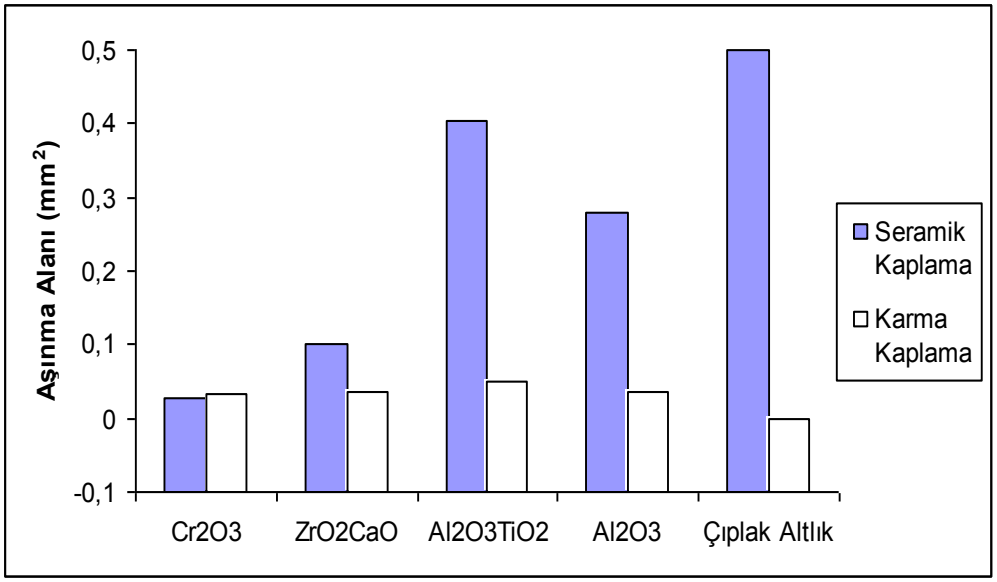


(b)

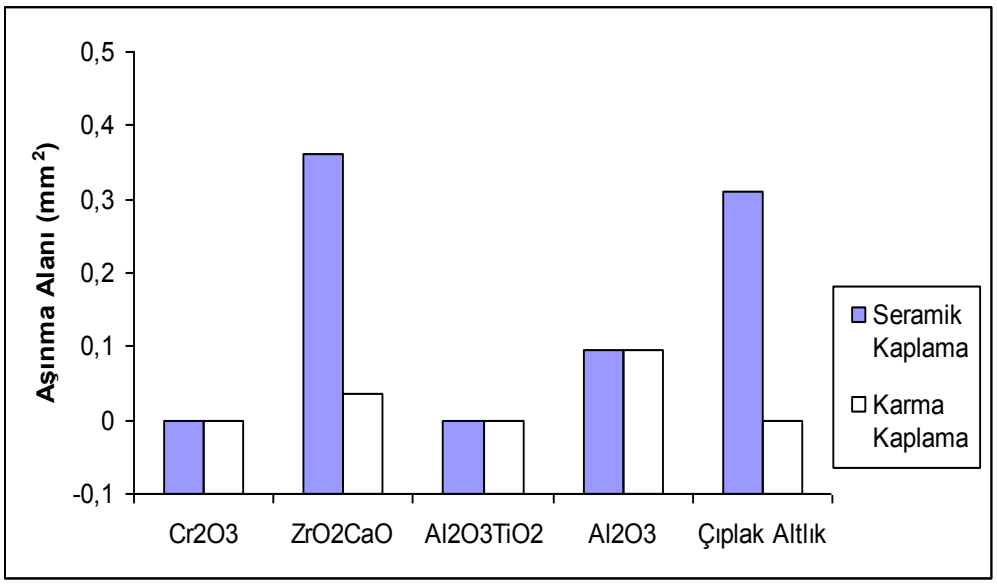
Şekil 6.5. (a) Alümina ve (b) çelik bilyelerle aşındırılan seramik kaplamaların aşınma iz alanları ile kaplama sertlikleri arasındaki ilişki (Yük=930 g).

6.2.2. Karma Kaplamalar

930 g yük altında yapılan aşınma deneylerinde searmik ve karma kaplamaların aşınma iz alanları Şekil. 6.6'da kıyaslanmıştır. Karma kaplamalarda oluşan aşınma iz alanları seramik kaplamalarda oluşan aşınma iz alanlarına nazaran daha küçüktür. Çelik bilye ile aşındırılan Cr_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ seramik ve karma kaplamalarında ölçülebilir iz alanı oluşmamıştır.



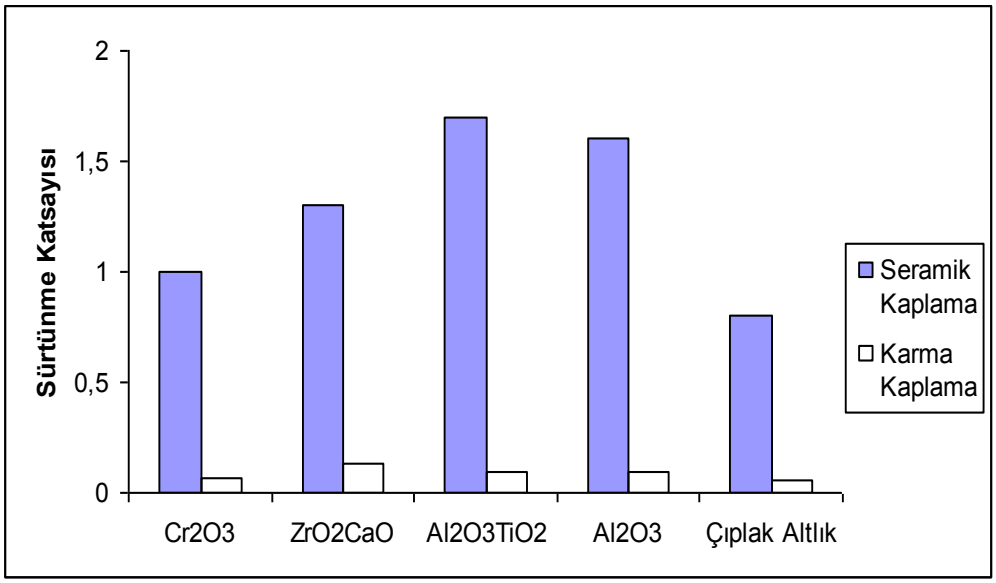
(a)



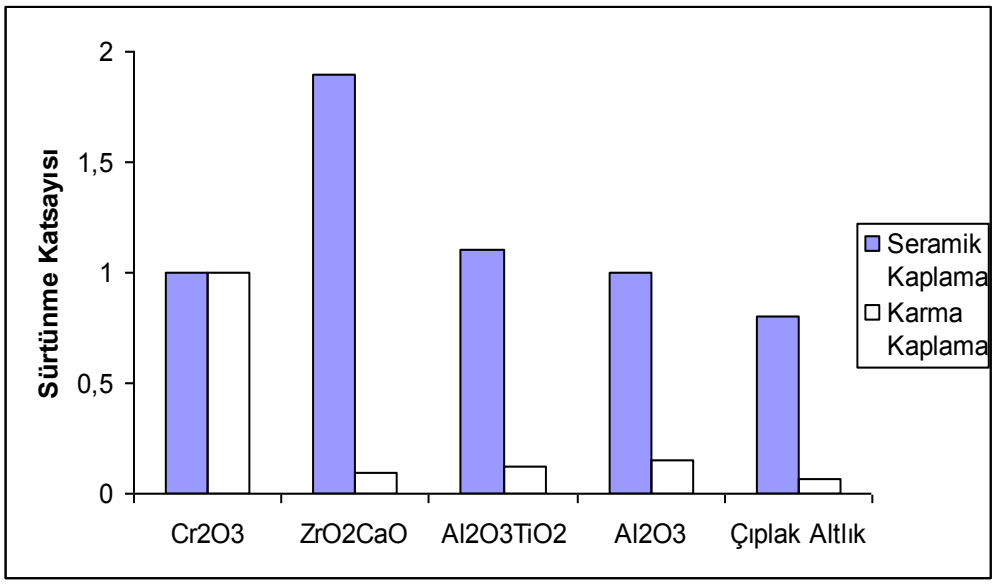
(b)

Şekil 6.6. (a) Alümina ve (b) çelik bilyelerle aşındırılan seramik ve karma kaplamalarda oluşan aşınma iz alanlarının karşılaştırması (Yük=930 g).

Ek E ‘de karma kaplamalarda deney sırasında sürtünme katsayısının değişimi verilmiştir. Sürtünme katsayısının karalı hale geldiği değerler Şekil 6.7’de görülmektedir. Seramik kaplamaların üzerine teflon kaplanarak oluşturulan karma kaplamalarda teflonun katı yağlayıcı görevi görmesi nedeniyle sürtünme katsayısı 0,1 ’in altına düşmüştür.



(a)



(b)

Şekil 6.7. Seramik ve karma kaplamaların (a) alümina ve (b) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneylerinde gösterdikleri kararlı hal sürtünme katsayılarının kıyaslanması (Yük = 930 g).

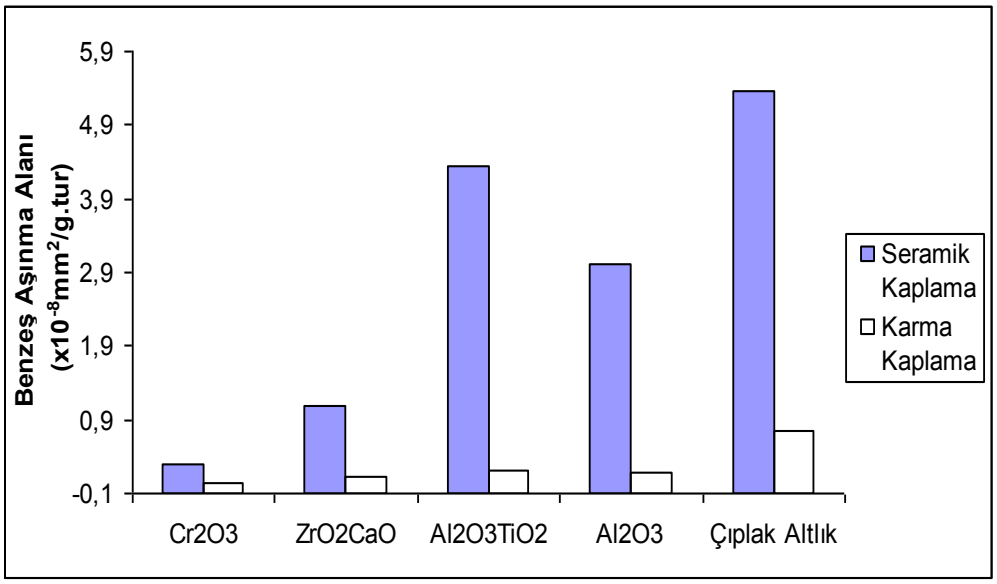
930 g yük ile yapılan aşınma deneylerinde karma kaplamalarda oluşan iz alanının ve sürtünme katsayısının çok düşük olması nedeniyle bu kaplamalar 1558 g'da daha uzun süreler aşınma deneylerine tabi tutulmuş ve deneyler sürtünme katsayısında ani bir artış (genellikle 0.5 düzeyi) oluncaya dek devam ettirilmiştir. Tablo 6.2.'de karma kaplamaların 1558 g yük ile test edildikleri tur sayıları görülmektedir.

Tablo 6.2. Karma kaplamaların test edildikleri tur sayıları (Yük=1558 g).

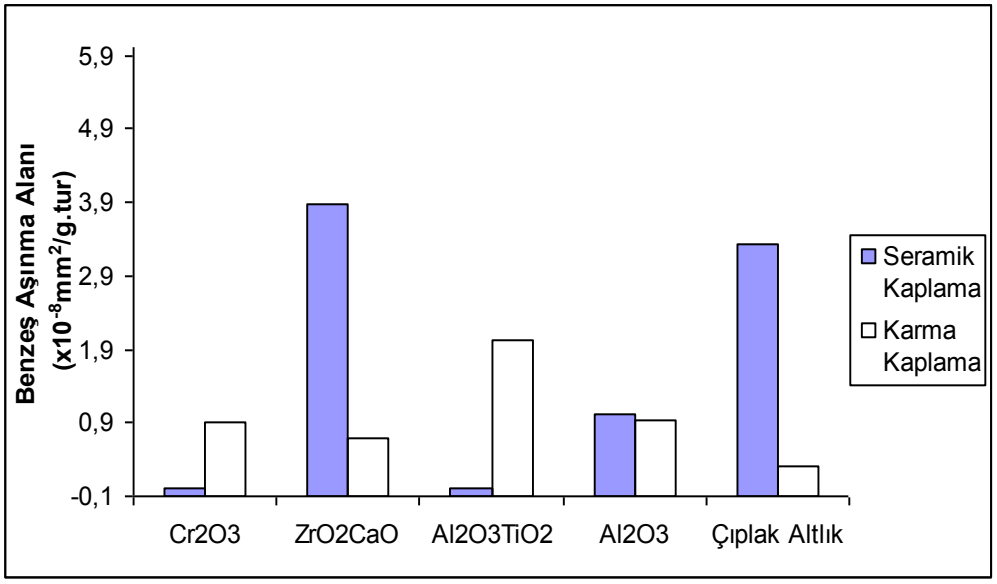
Malzeme	**Deneyin durdurulduğu tur sayısı**	
	Al_2O_3 Bilye	**Çelik Bilye**
Cr_2O_3-Teflon Karma Kaplaması	100.000	10.000
ZrO_2CaO-Teflon Karma Kaplaması	30.000	10.000
$Al_2O_3TiO_2$-Teflon Karma Kaplaması	20.000	10.000
Al_2O_3-Teflon Karma Kaplaması	60.000	10.000
Çıplak Altlık Üzerine Teflon Kaplama	40.000	50.000

Şekil 6.8 'de seramik kaplamalar ile karma kaplamaların aşınma davranışları kıyaslanmaktadır. Seramik kaplamalarda 930 g yük altında 10.000 turda oluşan aşınma iz alanları, karma kaplamalarda ise 1558g'da Tablo 6.2'deki tur sayılarında oluşan aşınma iz alanları dikkate alındığında, farklı yük ve tur sayıları için deney sonuçları birim yük başına birim turda oluşan aşınma iz alanı olarak mm^2/g.tur birimiyle verilmiştir.

Buna göre, yüzeyin teflon ile kaplanması aşınmayı önemli derecede azaltmıştır. Bu gözlem özellikle alümina bilye ile yapılan deneylerde kendini belirgin olarak göstermektedir. Teflonlu yüzeylerin kayma sırasında düşük sürtünme katsayısı göstermelerinin nedeni, zincir şeklindeki teflonun moleküler ekseni boyunca zayıf bir yapıya sahip olmasındandır. Moleküler zincir kısa ve dallantısız olup, moleküller arasında sadece zayıf Van-der-Waals kuvvetleri mevcuttur. Bu moleküller kayma doğrultusunda yönlenirler ve kayma kolaylaşır. Bu sayede düşük kayma gerilmelerinde dahi kayma mümkün olabilir [1].



(a)



(b)

Şekil 6.8. Seramik ve karma kaplamalarda (a) alümina ve (b) çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu birim yük ve birim turda oluşan aşınma iz alanlarının kıyaslanması.

7.GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma çerçevesinde ticari saflıktaki alüminyumun kaplamasız, seramik (Cr_2O_3, ZrO_2CaO, Al_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$) kaplamalı ve karma kaplamalı (seramik + teflon) hallerdeki aşınma davranışları salınım hareketli aşınma test cihazı ile alümina ve çelik bilyelerle aşındırılarak test edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre aşağıdaki genellemeleri yapmak mümkündür.

1-Gerek alümina gerekse çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde kaplamasız haldeki alüminyum en fazla aşınmayı gösteren malzeme olmuştur. Bu durum alüminyumun söz konusu tribolojik koşullar için uygun bir malzeme olmadığını göstermektedir.

2- Seramik kaplamalar arasından Cr_2O_3 kaplama en sert kaplama olup, her iki bilyeye karşı yapılan aşınma deneylerinde en yüksek aşınma direncini göstermiştir. Alümina bilye ile yapılan deneylerde aşınma direncinin büyükten küçüğe sıralaması Cr_2O_3, ZrO_2CaO, Al_2O_3 ve $Al_2O_3TiO_2$ iken, çelik bilyede bu sıralama Cr_2O_3, $Al_2O_3TiO_2$, Al_2O_3 ve ZrO_2CaO şeklindedir.

3- Seramik kaplamaların üzerine teflon kaplanması sürtünme katsayısını büyük ölçüde düşürerek 0.1'in altına indirmiştir. Bu sayede aşınma azalmış ve kaplamaların servis ömrü artmıştır. İncelenen seramik kaplamalar arasında en az aşınan Cr_2O_3 'ün üzerine teflon kaplanmasıyla elde edilen Cr_2O_3 / Teflon karma kaplama en yüksek aşınma direncini sergilemiştir.

Yukarıdaki bulgulara göre, teflon kaplama katı yağlayıcı görevi görerek seramik kaplamaların sürtünme katsayısını düşürüp, aşınma direncini artırarak servis ömrünü uzatmaktadır. Bu uygulama sayesinde çevreye zararlı bir takım kimyasal katkı maddeleri içeren ve kimi koşullarda (yüksek sıcaklıklarda, çok düşük basınçlarda) işlevini yitiren sıvı yağların kullanımı azaltılabilir. Ancak bu konuda farklı malzeme ve çalışma koşullarına göre daha ileri çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Gadow, R., Scherer, D.,** 2000. Combined coatings on light metal alloys for application under dry sliding conditions, *10th. International Metallurgy and Materials Congress*, İstanbul, Türkiye, 24-28 May, 861-868.

[2]**. Cox, J.W.,** 2001. Wear and corrosion resistant hard coatings for non-cutting tool applications, in *Handbook of Hard Coatings*, pp. 412-413, Eds. Bunshah R.F., Noyes Publications, New York.

[3] **Kato, K.,** 2000. Wear in relation to friction – a review, *Wear*, 241, 151-157.

[4] **Tucker, R.C.**,.1997. The use of thermal spray coatings for protection against wear and corrosion, in *Protective Coatings and Thin Films*, pp. 387-399, Eds. Pauleau, Y., Barna, P.B. Kluwer Academic Publications, Netherlands.

[5] **Psyllaki, P.P., Jeandin, M., Pantelis, D.I.,** 2001. Microstructure and wear mechanisms of thermal-sprayed alumina coatings, *Materials Letters*, 47, 77-82.

[6] **Mantyla, T.A., Niemi, K., Kumpulainen, E., Knuuttila, J., Vuoristo, P**., 1997. Wear and corrosion resistance of thermally sprayed ceramic oxide coatings, in *Protective Coatings and Thin Films*, pp. 421-430, Eds. Pauleau, Y., Barna, P.B. Kluwer Academic Publications, Netherlands.

[7] **Xie, Y., Hawthorne, H.M.,** 1999. Wear mechanism of plasma-sprayed alumina coating in sliding contacts with harder asperities, *Wear*, 225, 90-103.

[8] **Çevik, İ.**, 1990. Zirkonya esaslı seramik kaplamanın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[9] **Geiger, G**., 1992. Ceramic coatings, *American Ceramic Society Bulletin*, 71, 1470-1476.

[10**] Hutchings, I.M.,** 1992, Tribology : Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold Publications, Great Britain.

[11] **Chagnon, P., Fauchais**, **P**., 1984. Thermal Spraying of Ceramics, *Ceramics International*, 10, 119-131.

[12] **Heimann, R.B.,** 1996. Applications of plasma sprayed ceramic coatings, in *Advanced Ceramic Materials*, pp.419-421, Eds. Mostaghaci, H., Trans Tech Publications.

[13] **Tucci, A., Esposito, L.,** 1994. Microstructure and tribological properties of ZrO_2 ceramics, *Wear*, 172, 111-119.

[14] **Geçkinli, E.,** 1992. İleri Teknoloji Malzemeleri, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.

[15] **Tucker, R.C.,** 1996. Introduction to thermal spray coatings, in *Handbook of Thin Film Process Technology*, pp.A4.0:1-A4.1:16, Eds. Glocker, D.A., Shah, S.I., IOP Publishing.7

[16] **Kwin, B.F.,** 1989. How to apply thermal-spray coatings, *Welding Design & Fabrication*, 43-46.

[17 **Unger, R.H.,** 1988. Comparison of thermal sprayed bond coats, *Proceedings of the National Thermal Spray Conference*, Ohio, USA, 365-370.

[18] **Smith, R.W., Novak, R.,** 1991. Thermal spraying, *Powder Metallurgy International*, 3, 147-155.

[19] **Samur, R., Salman, S., Kaya, A.A.,** 1995. Seramik kaplamalarda bağ mukavemeti üzerine deneysel gözlemler, *8.˙Uluslararsı Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 6-9 Haziran, 397-406.

[20] **Bhushan, B., Gupta, B.K.,** 1991. Handbook of Tribology, Mc Graw-Hill, New York.

[21] **Akman, H.**, 2001. Endüstride karşılaşılan aşınma problemlerinin incelenmesi ve tamir-bakım kaynak yöntemleri uygulanarak kullanım ömürlerinin uzatılması, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[22] **Üstel, F.**, 1995. Plazma sprey kaplama teknolojisi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[23]**. Sahoo, P.,** 1993. High performance wear coatings-The quest continuities, *Powder Metallurgy International*, 25, 73-78.

[24] **Villat, M.,** Functionally effective coatings using plasma spraying, *Sulzer Technical Review*, 3, 41-45.

[25] **Gadow, R., Scherer, D.,** 2002. Composite coatings with dry lubrication ability on light metal substrates, *Surface Coatings & Technology*, 151-152, 471-477.

[26] **Kim, H.J., Lee, C.H., K, Y.G.,** 2001, The effects of sealing on the mechanical properties of the plasma-sprayed alumina-titania coating, *Surface Coatings & Technology*, 139, 75-80.

[27] **Pamuk, U., Çimenoğlu, H.,** 2000. Plazma spreylenmiş Al_2O_3-TiO_2 seramik kaplamaların abrasiv aşınma davranışlarının incelenmesi, *10.˙Uluslararsı Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 24-28 Mayıs, 855-860.

[28] **Fervel, V., Normand, B., Liao, H., Coddet, C., Beche, E., Berjoan, R.,** 1999, Friction and wear mechanisms of thermally sprayed ceramic and cermet coatings, *Surface Coatings & Technology*, 111, 255-262.

[29] **Erickson, L.C., Hawthorne, H.M., Troczynski, T.,** 2001, Correlations between microstructural parameters, micromechanical properties and wear resistance of plasma sprayed ceramic coatings, *Wear*, 250, 569-575.

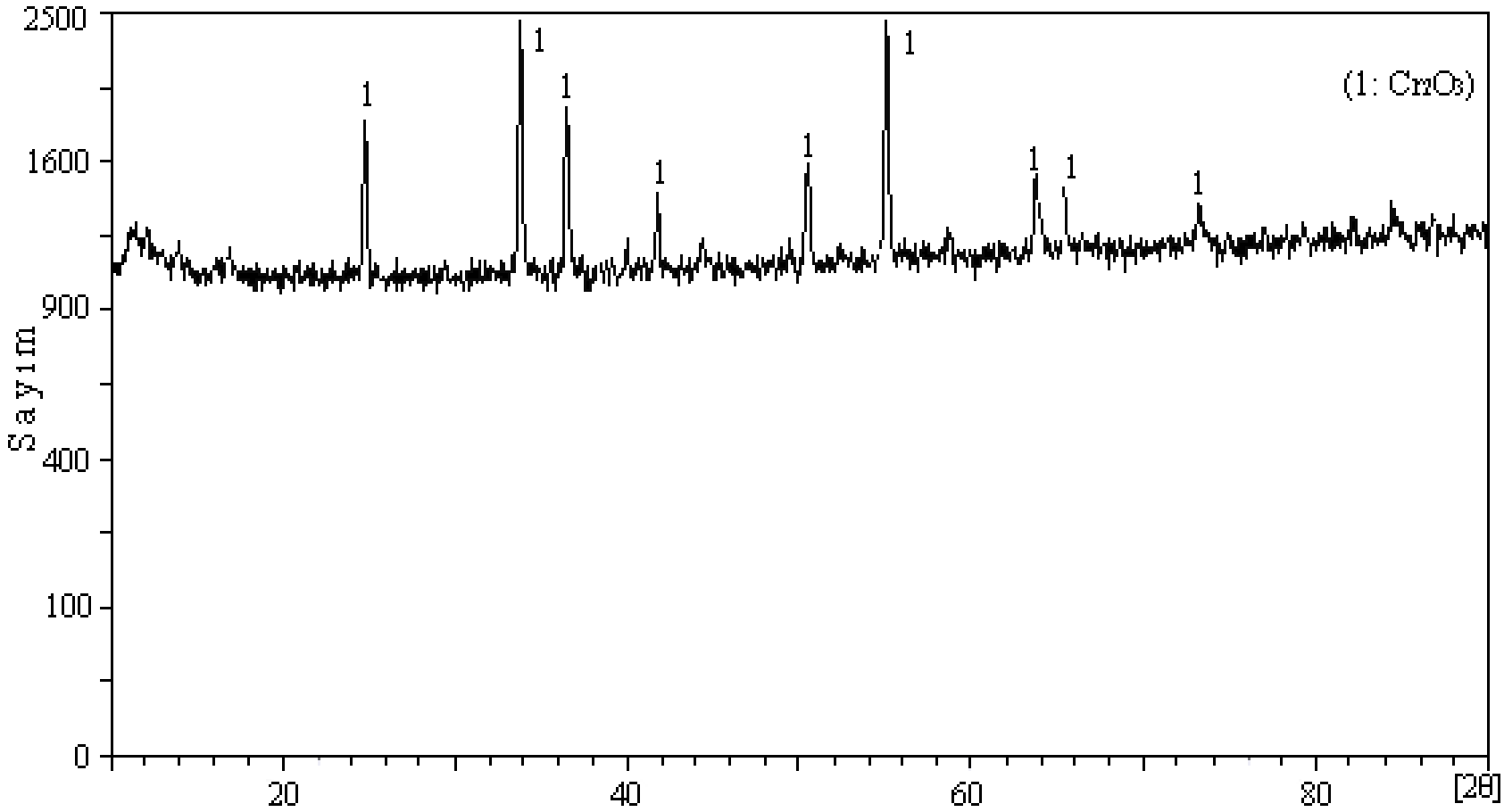
[30] **Furukubo, K., Oki, S., Gohda, S.,** 1992, Relationship between wear and microstructures of ceramic spray coatings, *Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition*, Orlando, Florida, USA, 28 May – 5 June.

[31] **Yamada, K., Nakajima, H., Morimoto, J., Yamaguchi, A., and Arata, Y.,** 1992, Some properties of Al_2O_3-TiO_2 ceramic coatings produced by detonation gas spraying, *Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition*, Orlando, Florida, USA, 28 May – 5 June.

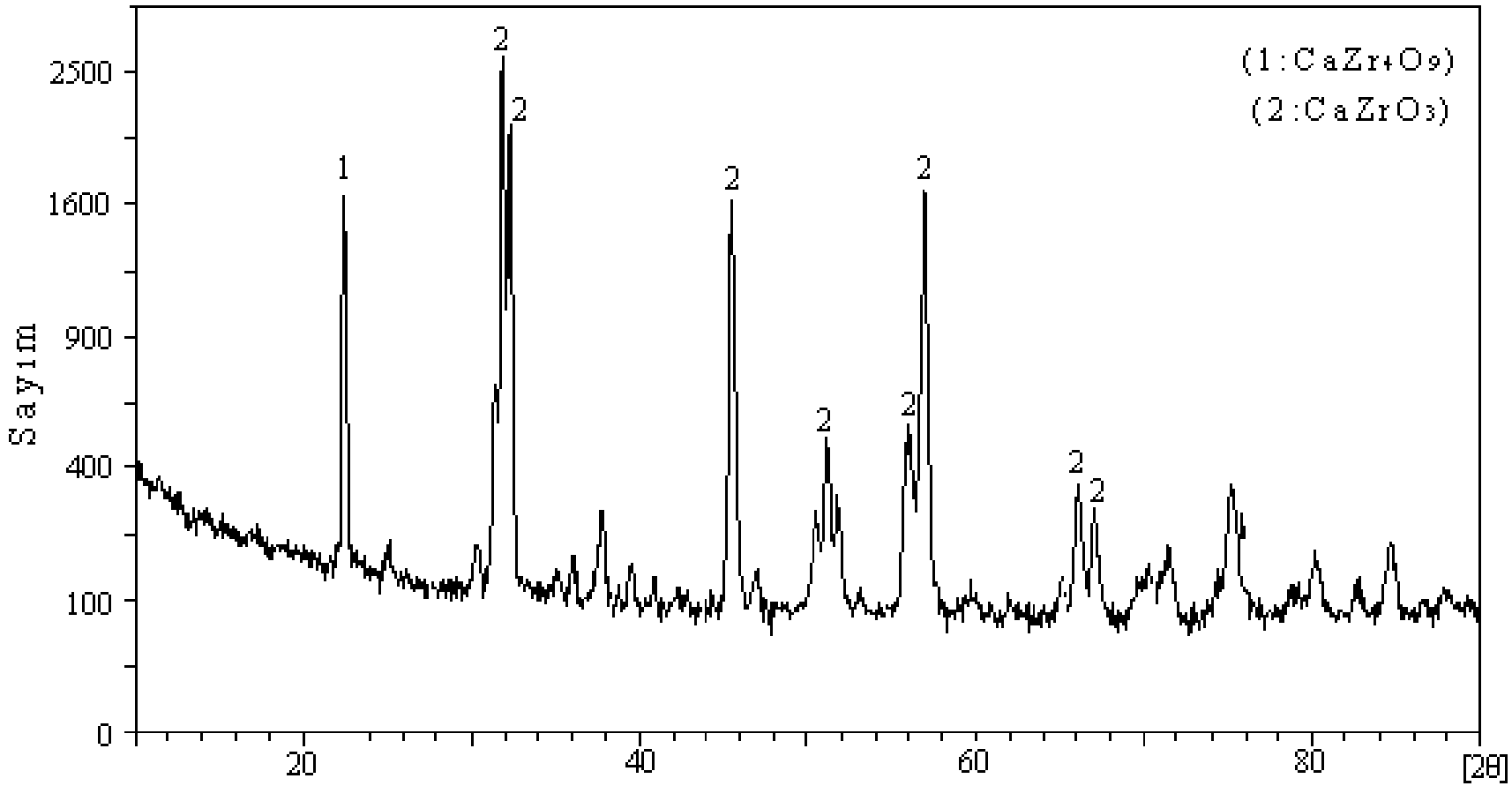
[32] http://www.sulzermetco.com

EKLER

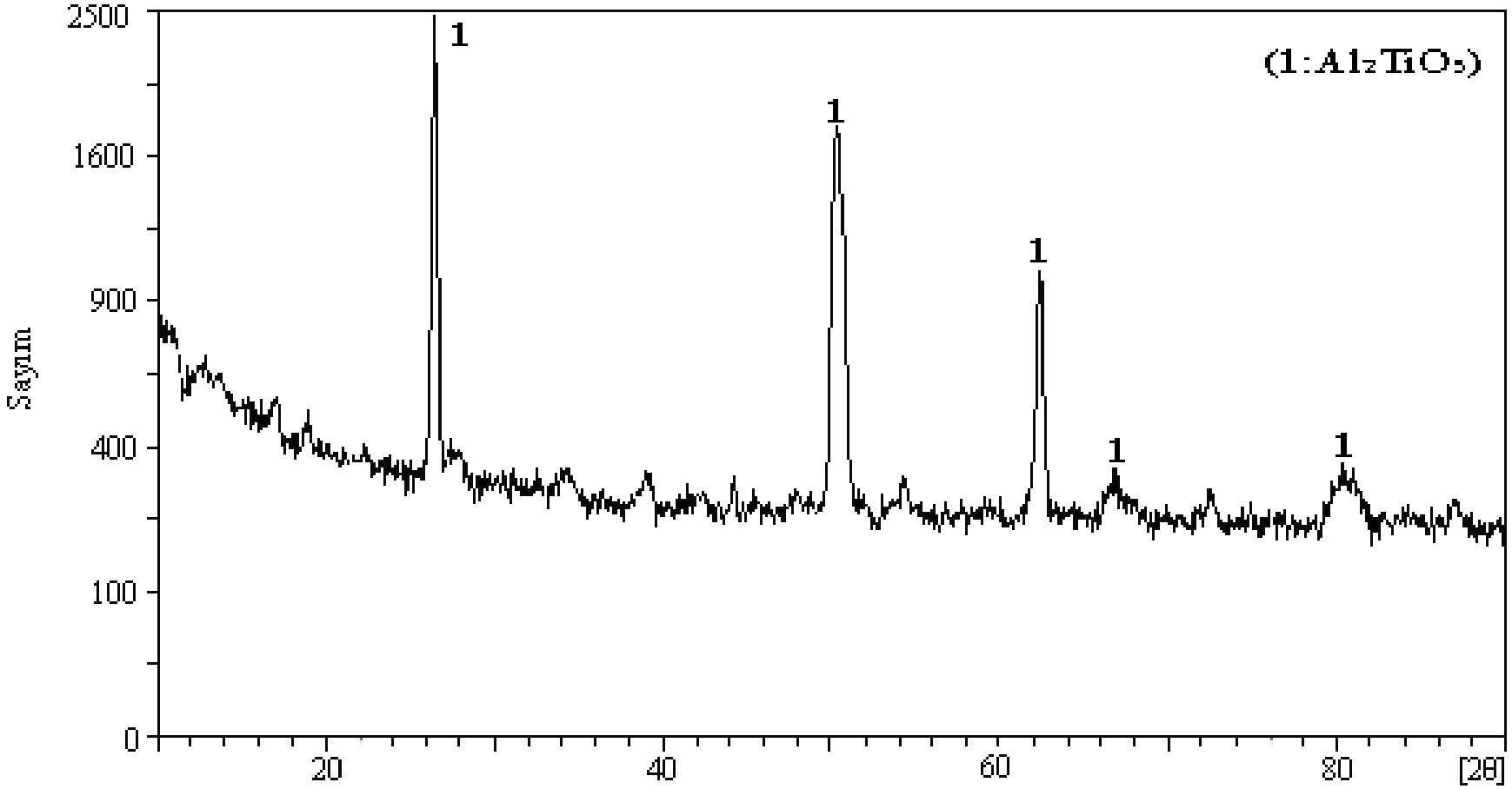
EK A



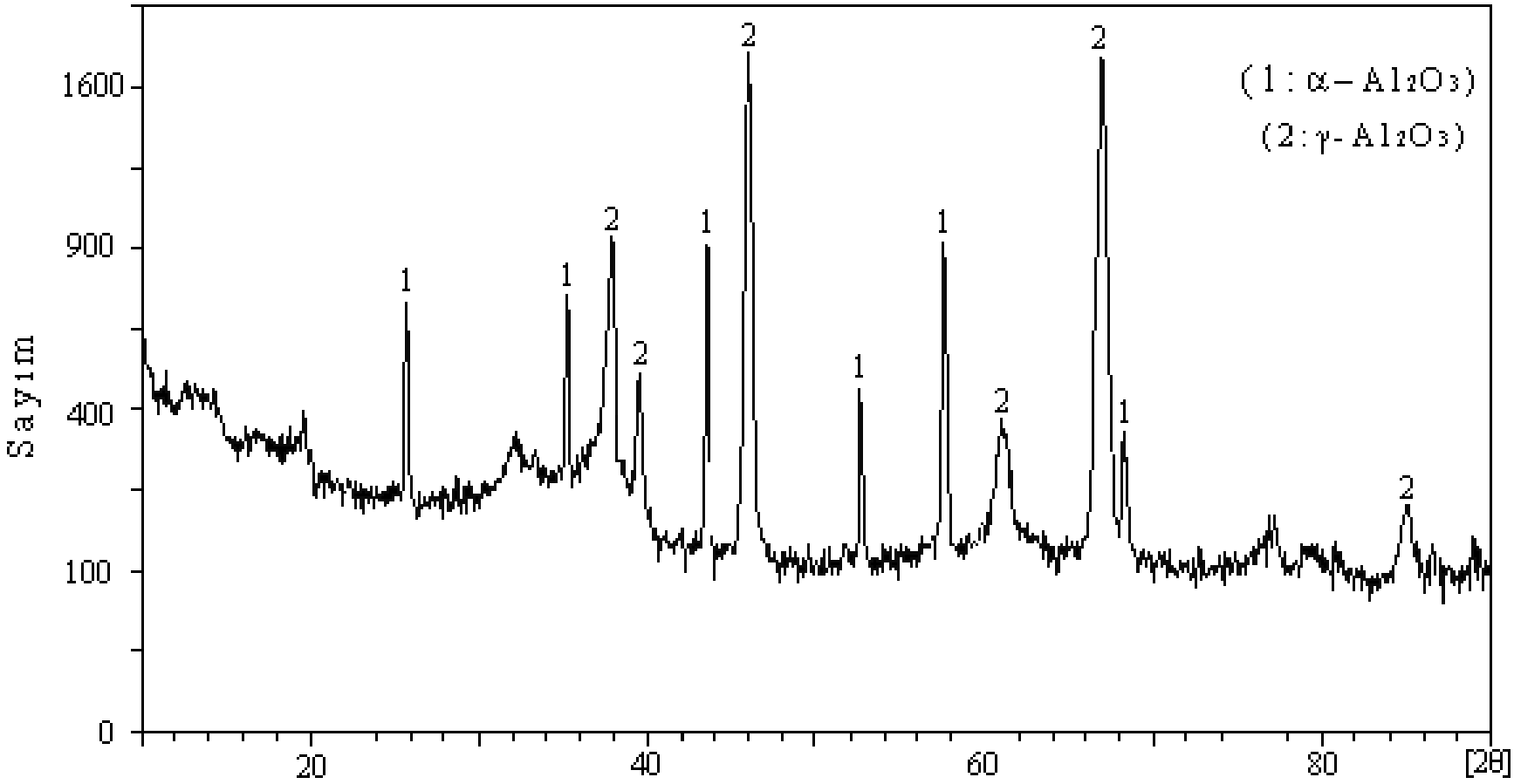
Şekil A.1. Cr_2O_3 kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı.



Şekil A.2. ZrO_2CaO kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı.

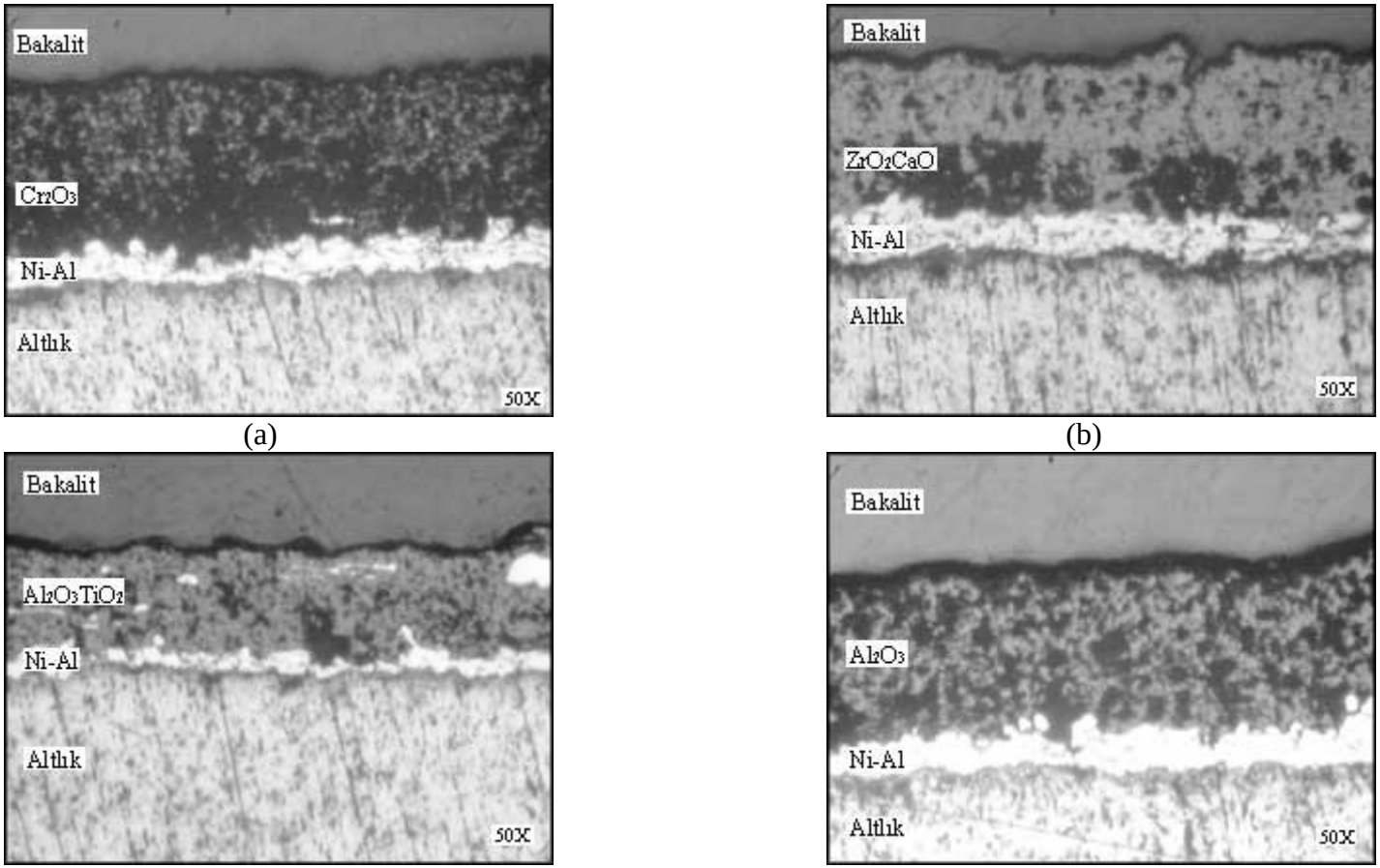


Şekil A.3 $Al_2O_3TiO_2$ kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı.

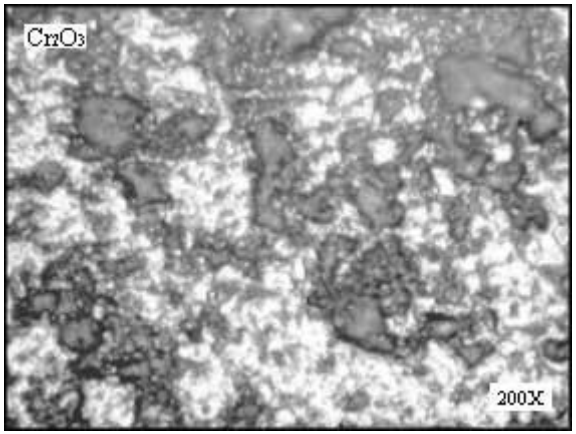


Şekil A.4. Al_2O_3 kaplamadan elde edilen X-ışını diyagramı.

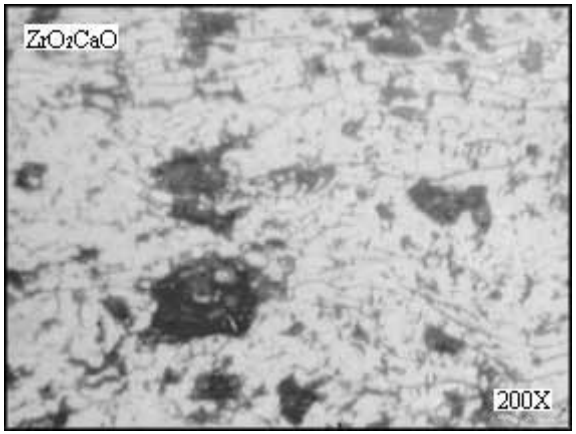
EK B



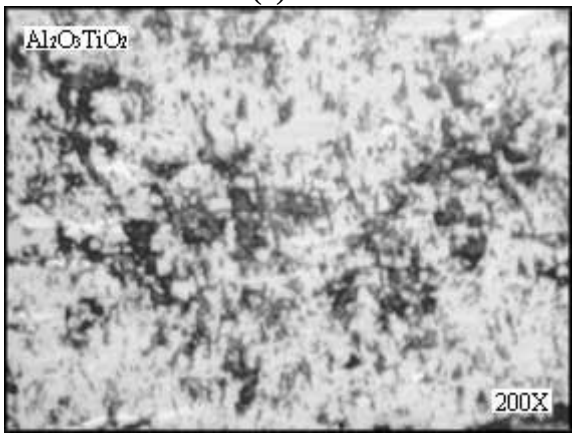
Şekil B.1. (a) Cr_2O_3 (b) ZrO_2CaO (c) $Al_2O_3TiO_2$ ve (d) Al_2O_3 kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri (50X).



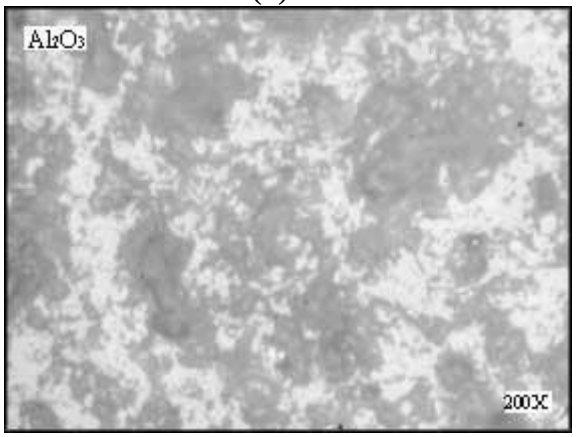
(a)



(b)



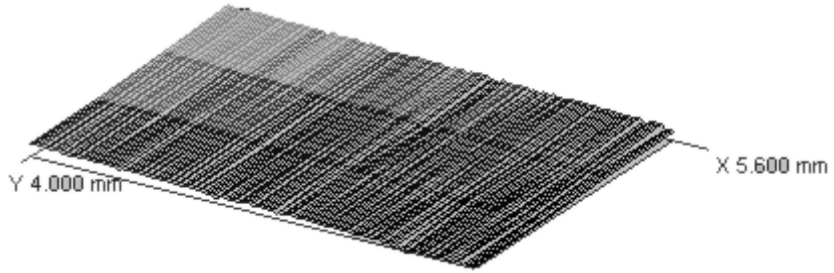
(c)



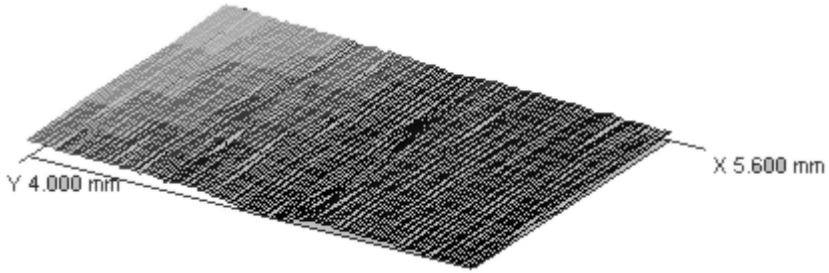
(d)

Şekil B.2. (a) Cr_2O_3 (b) ZrO_2CaO (c) $Al_2O_3TiO_2$ ve (d) Al_2O_3 kaplamaların optik mikroskop enine kesit görüntüleri (200X).

EK C



(a)



(b)

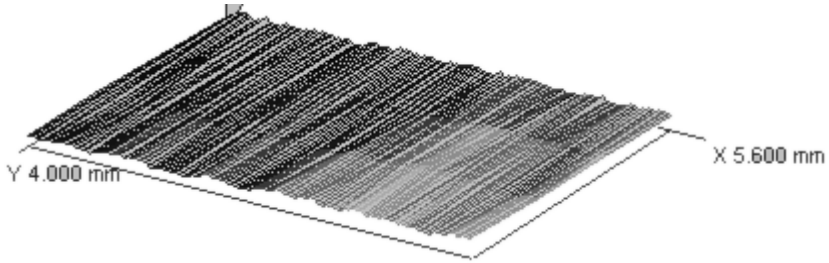


(c)

Şekil C.1. Cr_2O_3 kaplamanın (a) 496 g, (b) 737 g, ve (c) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye).



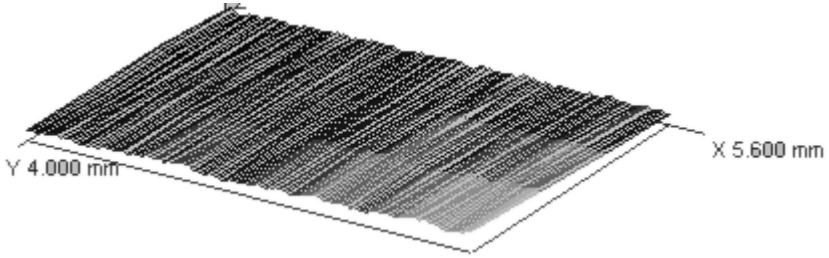
(a)



(b)



(c)

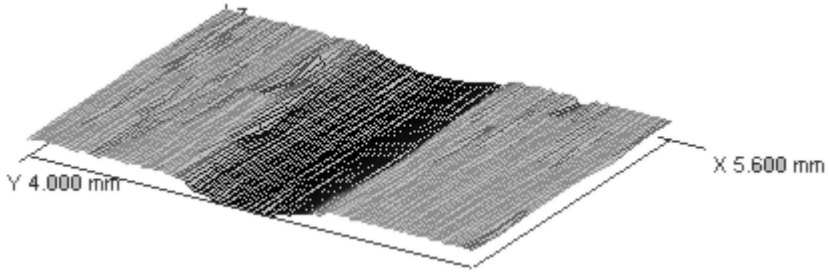


(d)

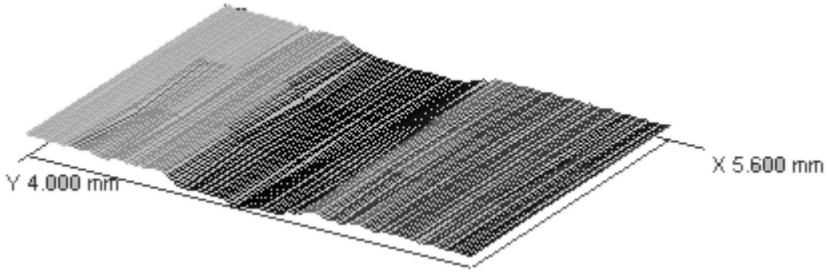
Şekil C.2. Cr_2O_3 kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye).



(a)



(b)

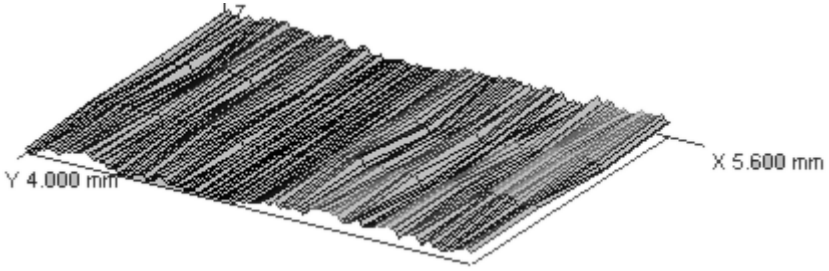


(c)

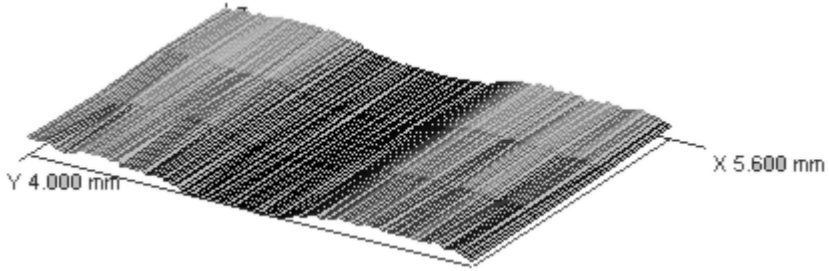
Şekil C.3. ZrO_2CaO kaplamanın (a) 496 g, (b) 737 g, ve (c) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye).



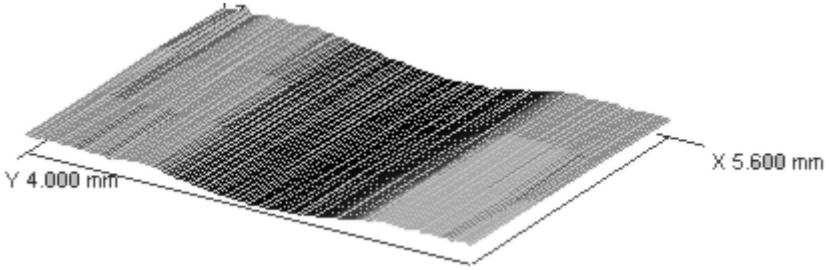
(a)



(b)

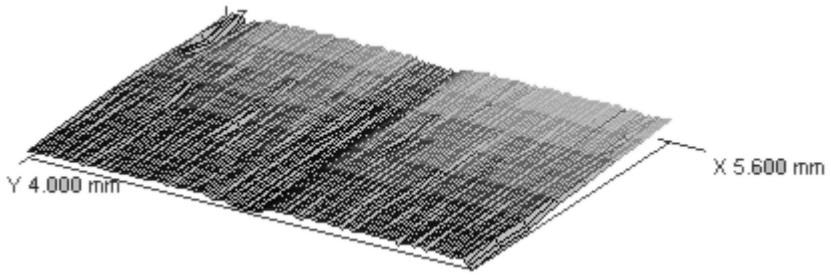


(c)

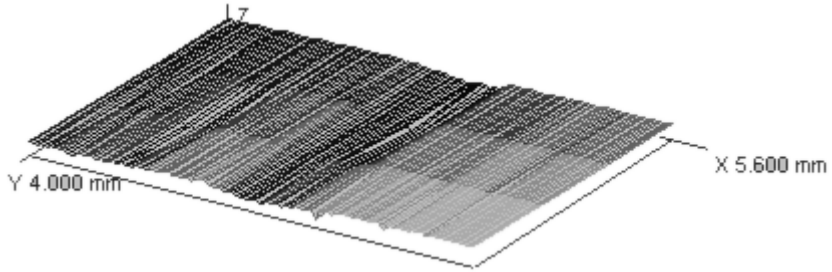


(d)

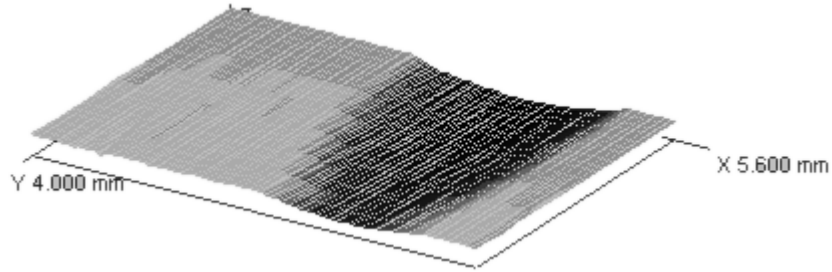
Şekil C.4. ZrO_2CaO kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye).



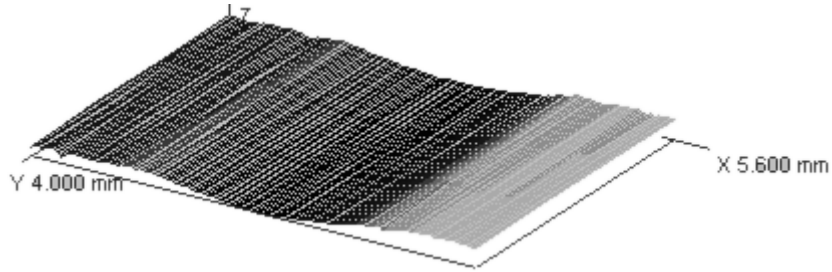
(a)



(b)

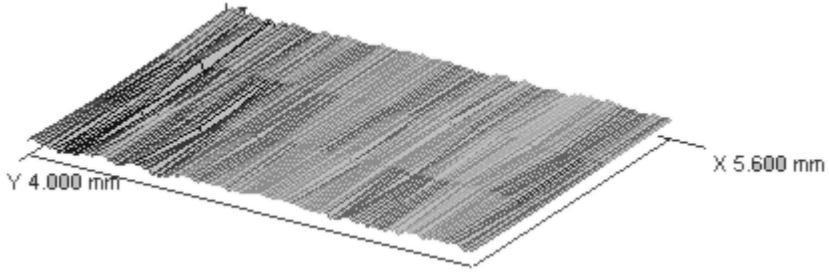


(c)

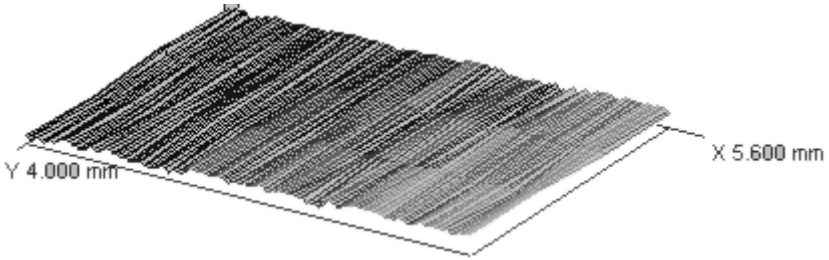


(d)

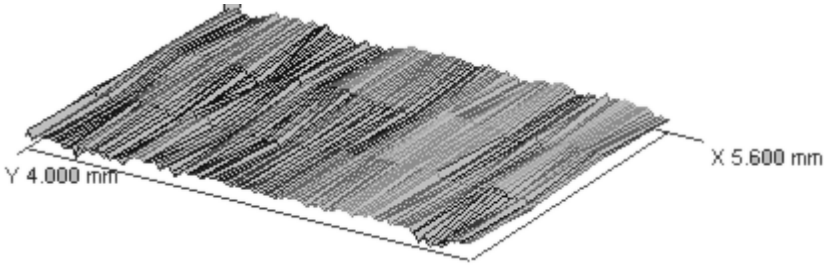
Şekil C.5. $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye).



(a)



(b)

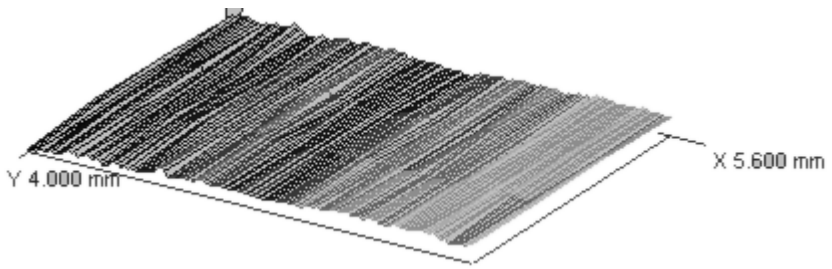


(c)



(d)

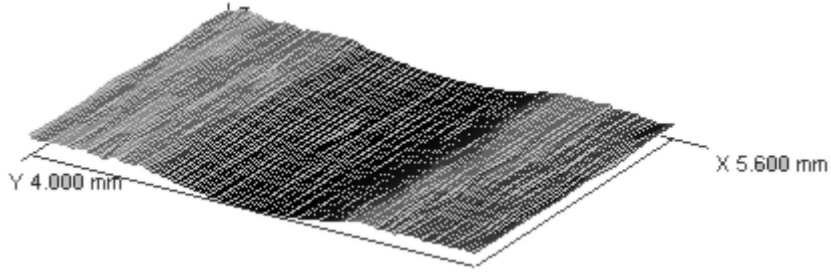
Şekil C.6. $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye).



(a)



(b)



(c)

Şekil C.7. Al_2O_3 kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g,ve (c) 737 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye).



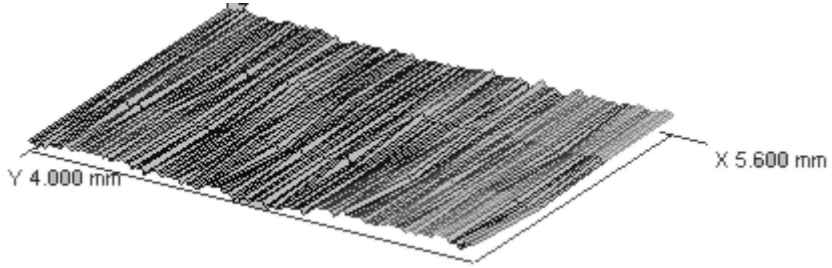
(a)



(b)

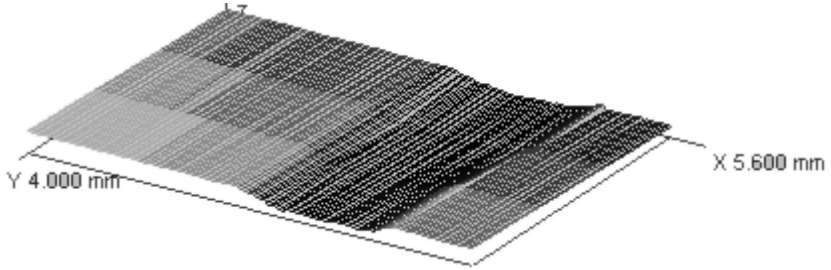


(c)

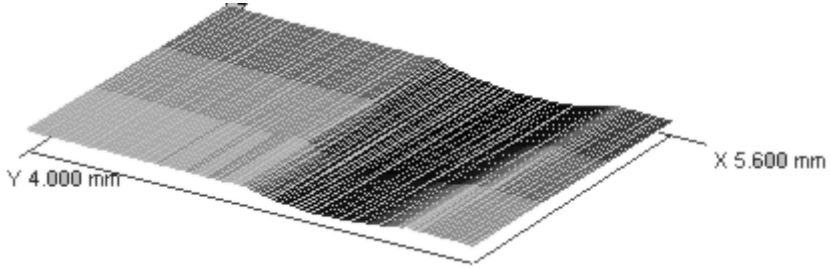


(d)

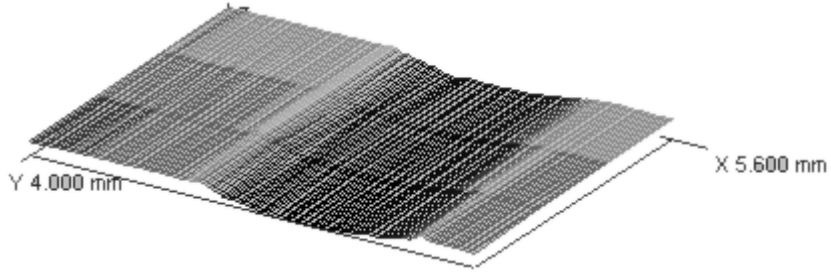
Şekil C.8. Al_2O_3 kaplamanın (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye).



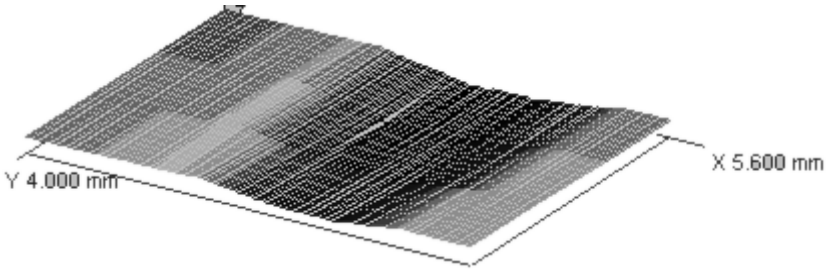
(a)



(b)

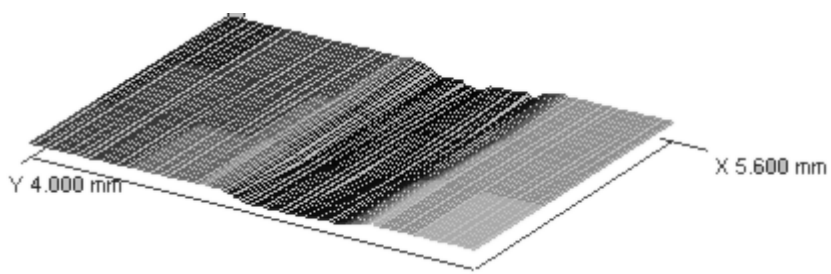


(c)

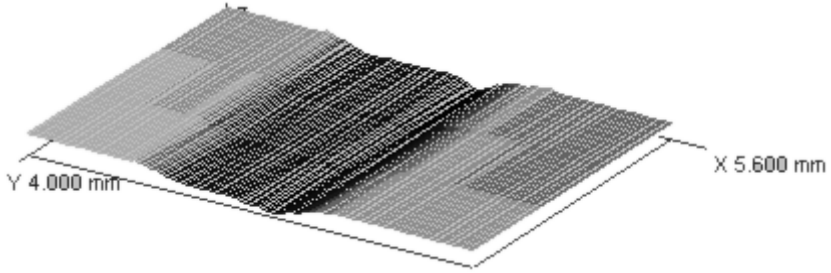


(d)

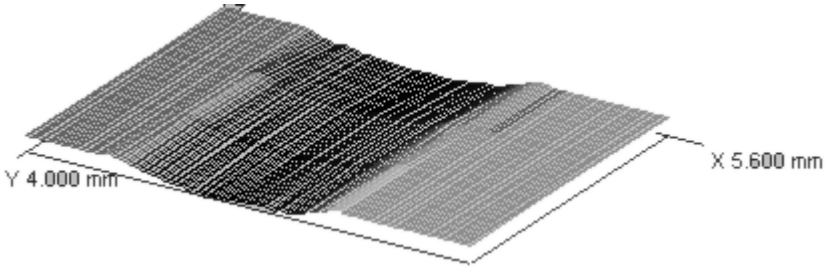
Şekil C.9. Altlık malzemenin (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : alümina bilye).



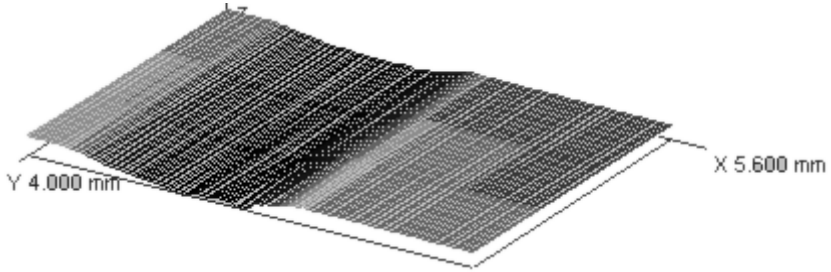
(a)



(b)

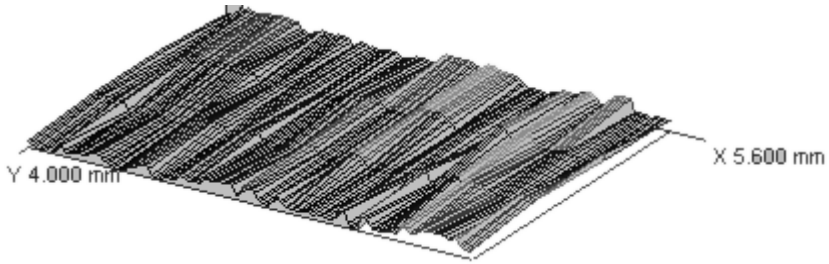


(c)

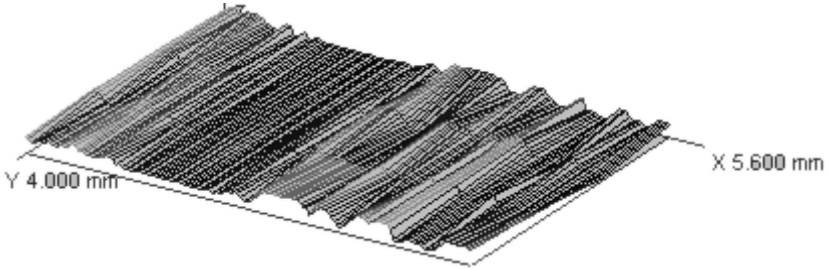


(d)

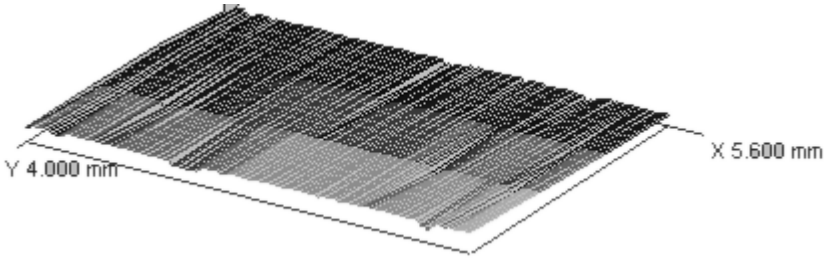
Şekil C.10. Altlık malzemenin (a) 275 g, (b) 496 g, (c) 737 g ve (d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri (Karşı malzeme : çelik bilye).



(a)



(b)

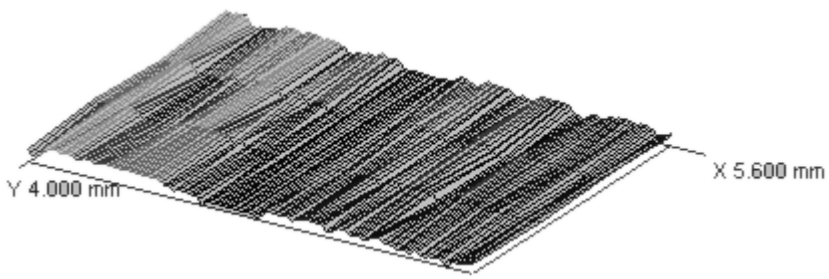


(c)

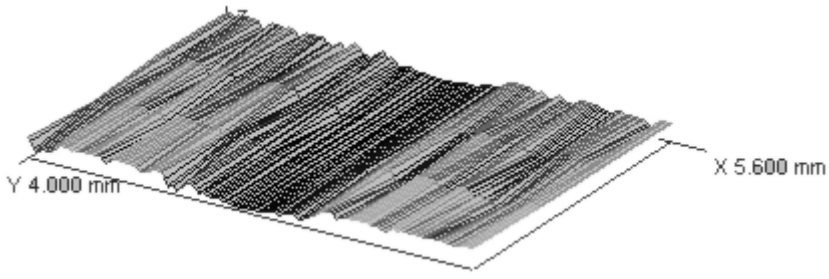


(d)

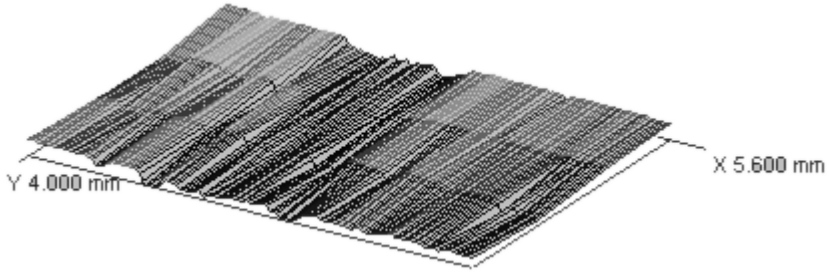
Şekil C.11. Cr_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve(d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri.



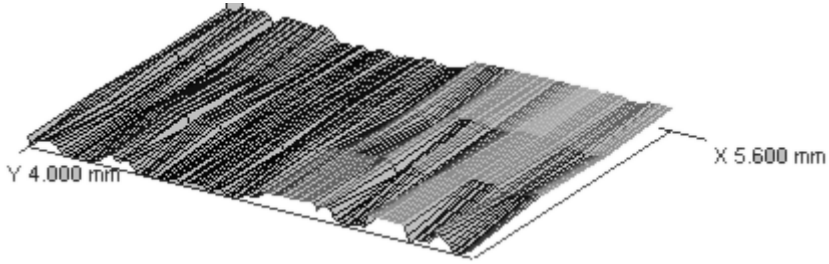
(a)



(b)



(c)



(d)

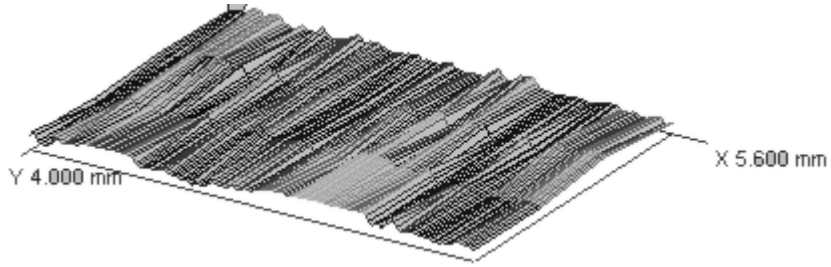
Şekil C.12. ZrO_2CaO / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri.



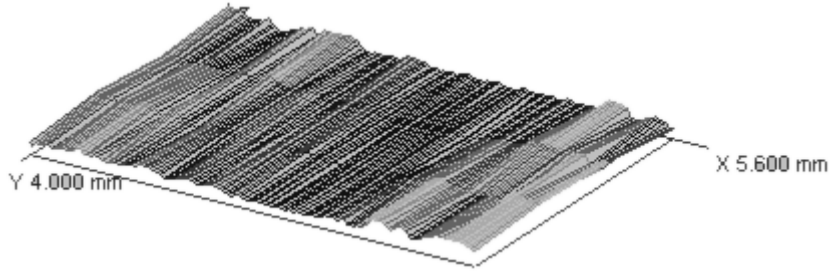
(a)



(b)

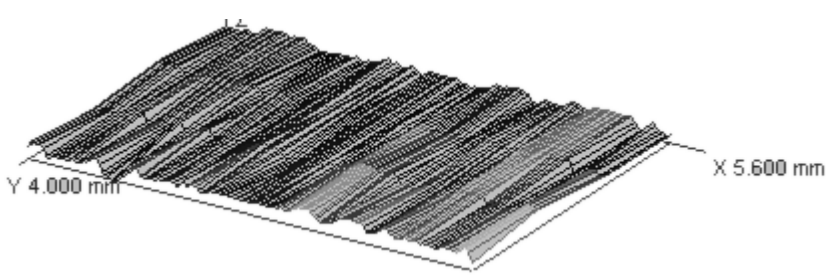


(c)

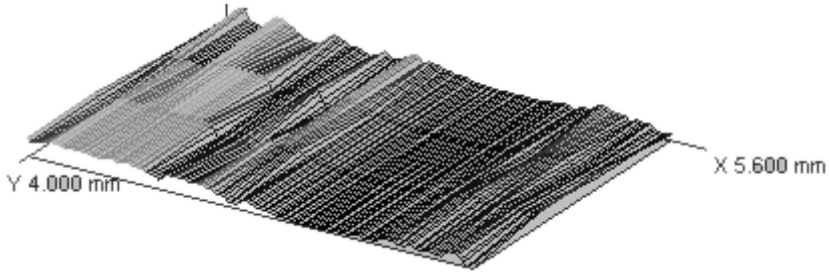


(d)

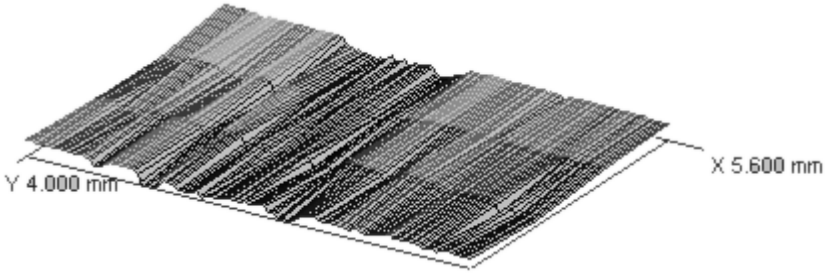
Şekil C.13. $Al_2O_3TiO_2$ / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri.



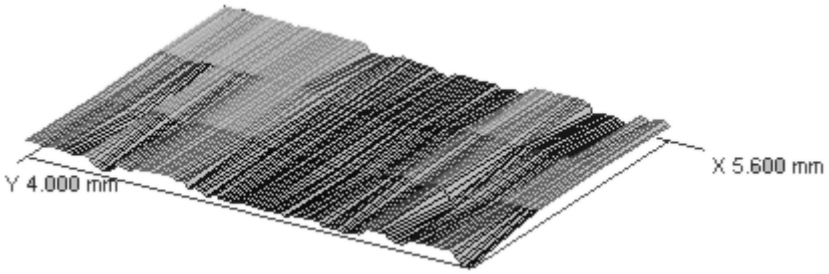
(a)



(b)

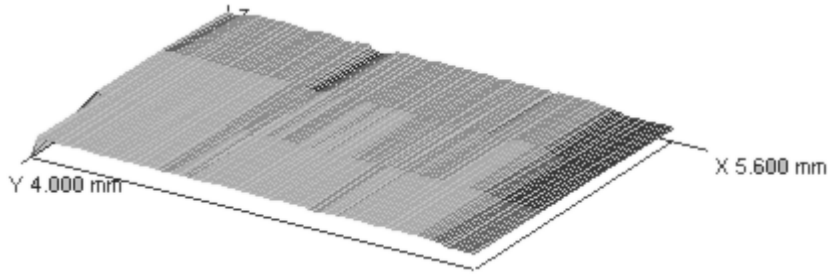


(c)

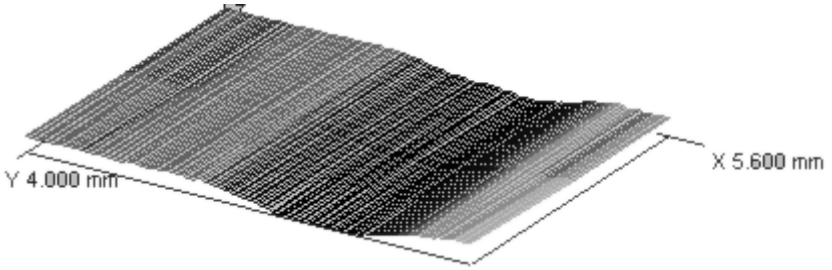


(d)

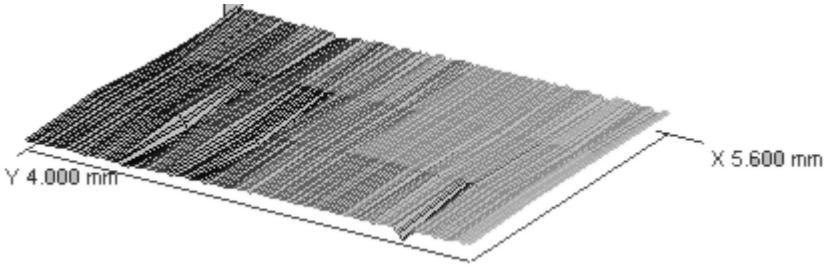
Şekil C.14. Al_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri.



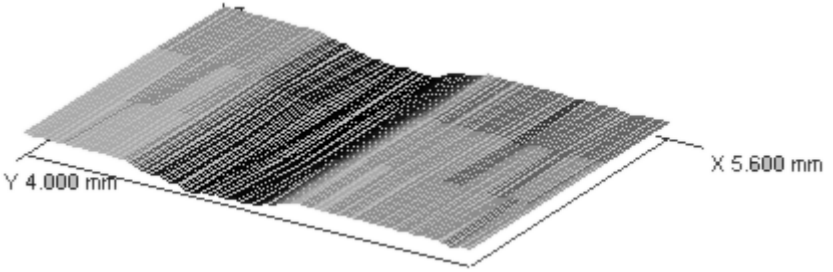
(a)



(b)



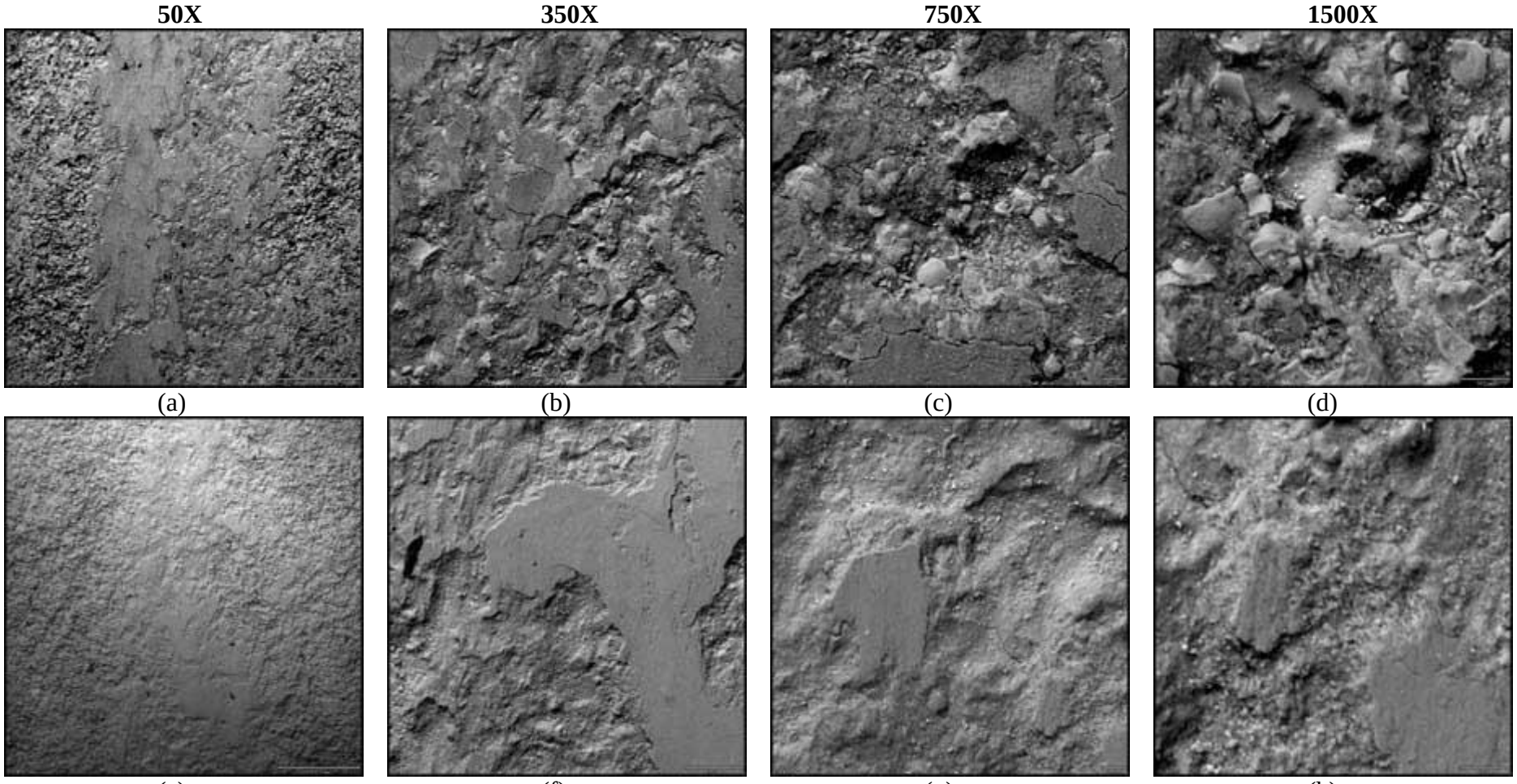
(c)



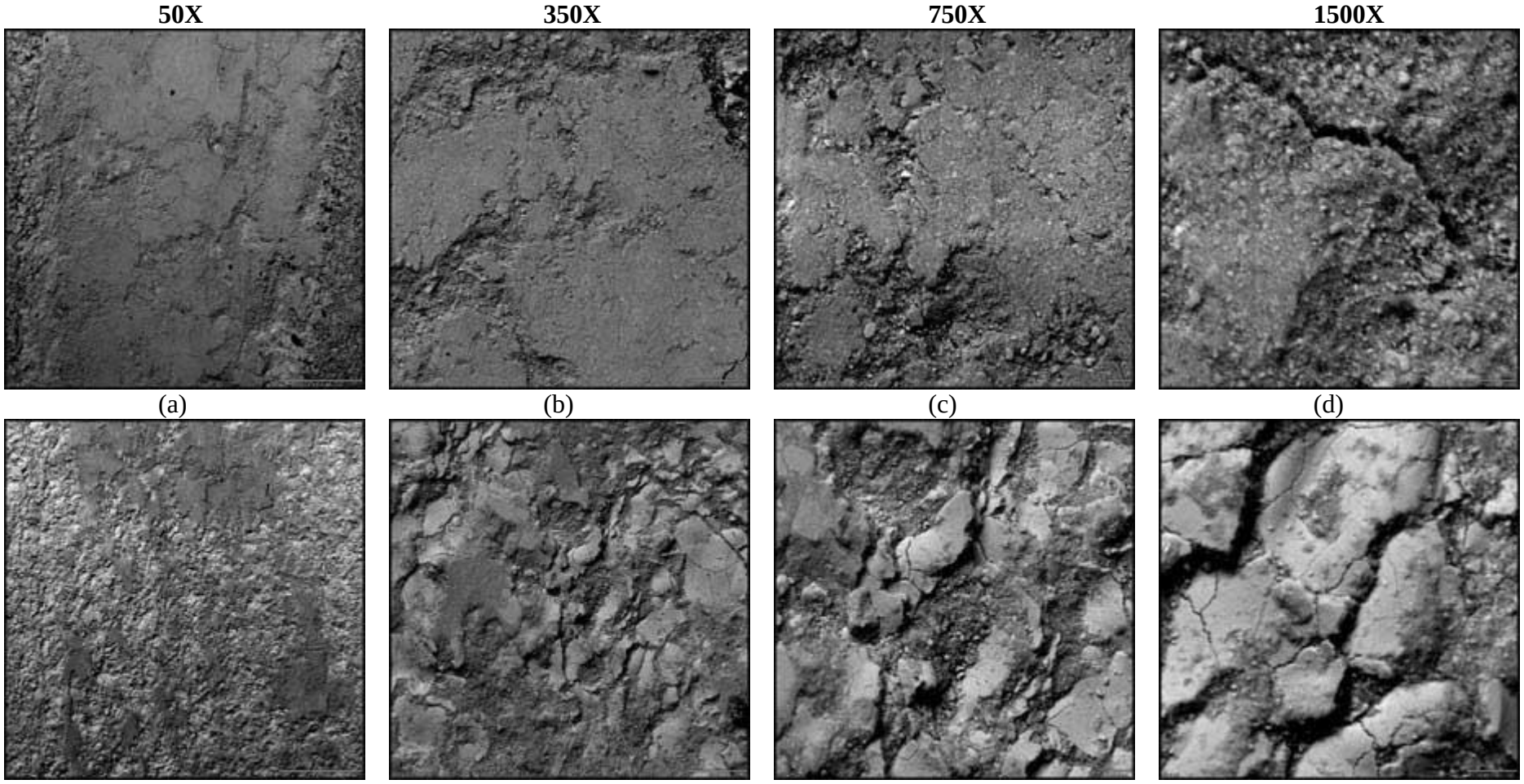
(d)

Şekil C.15. Çıplak altlık üzerindeki teflon kaplamanın (a) 930 g yük - alümina bilye, (b) 1558 g yük – alümina bilye, (c) 930 g yük – çelik bilye ve (d) 1558 g yük – çelik bilye ile yapılan aşınma deneyleri sonucu oluşan yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri.

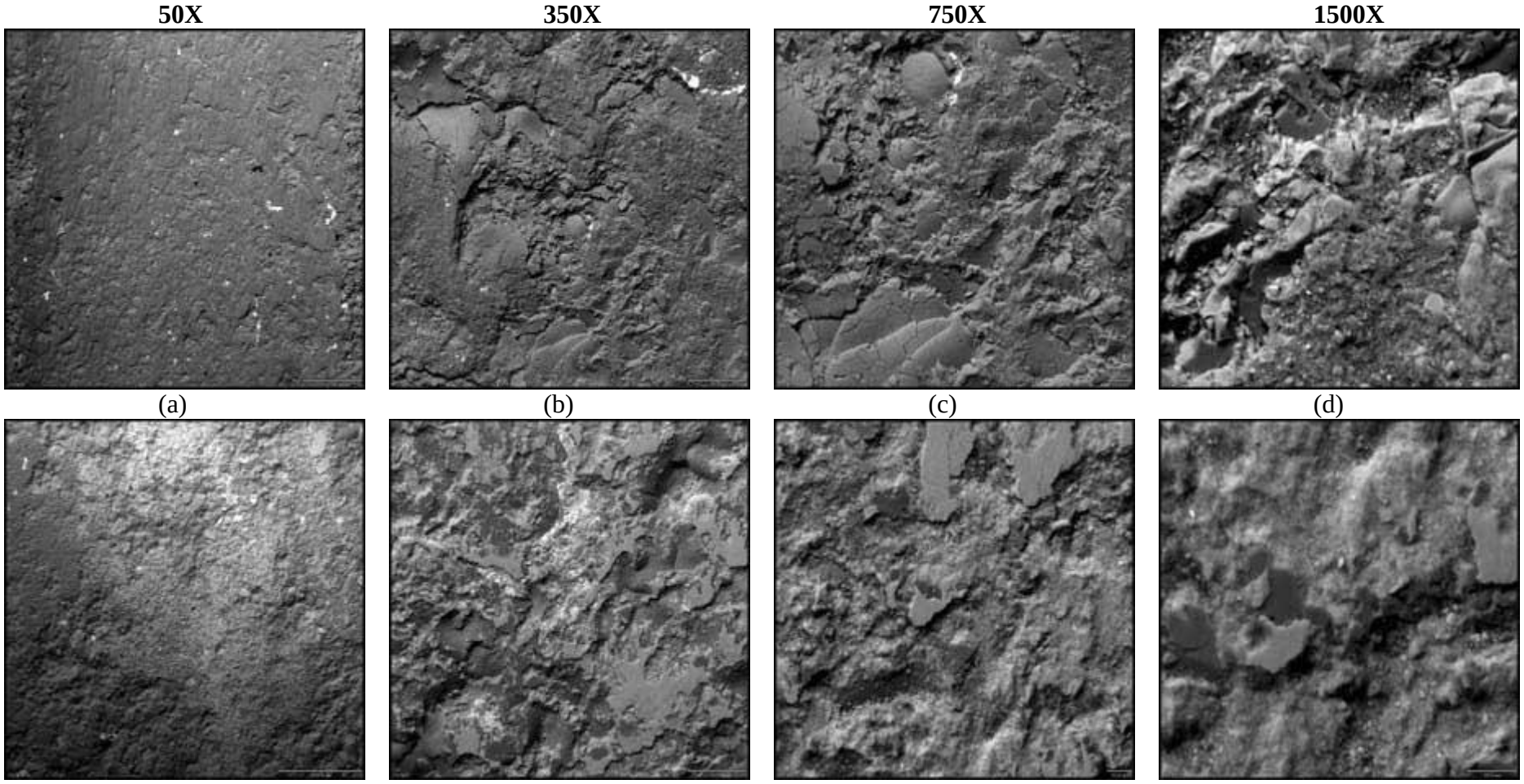
EK D



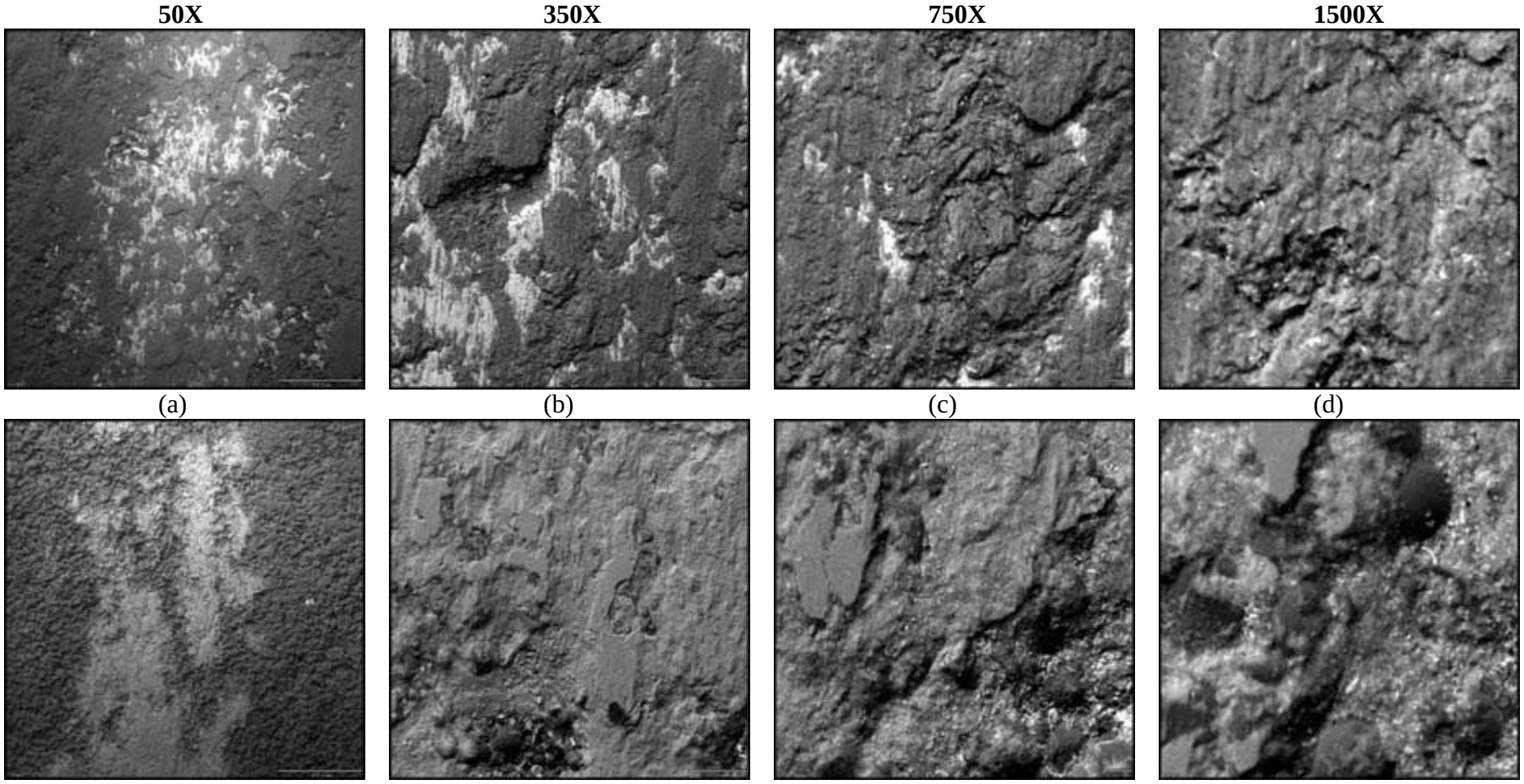
Şekil D.1. Cr_2O_3 kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



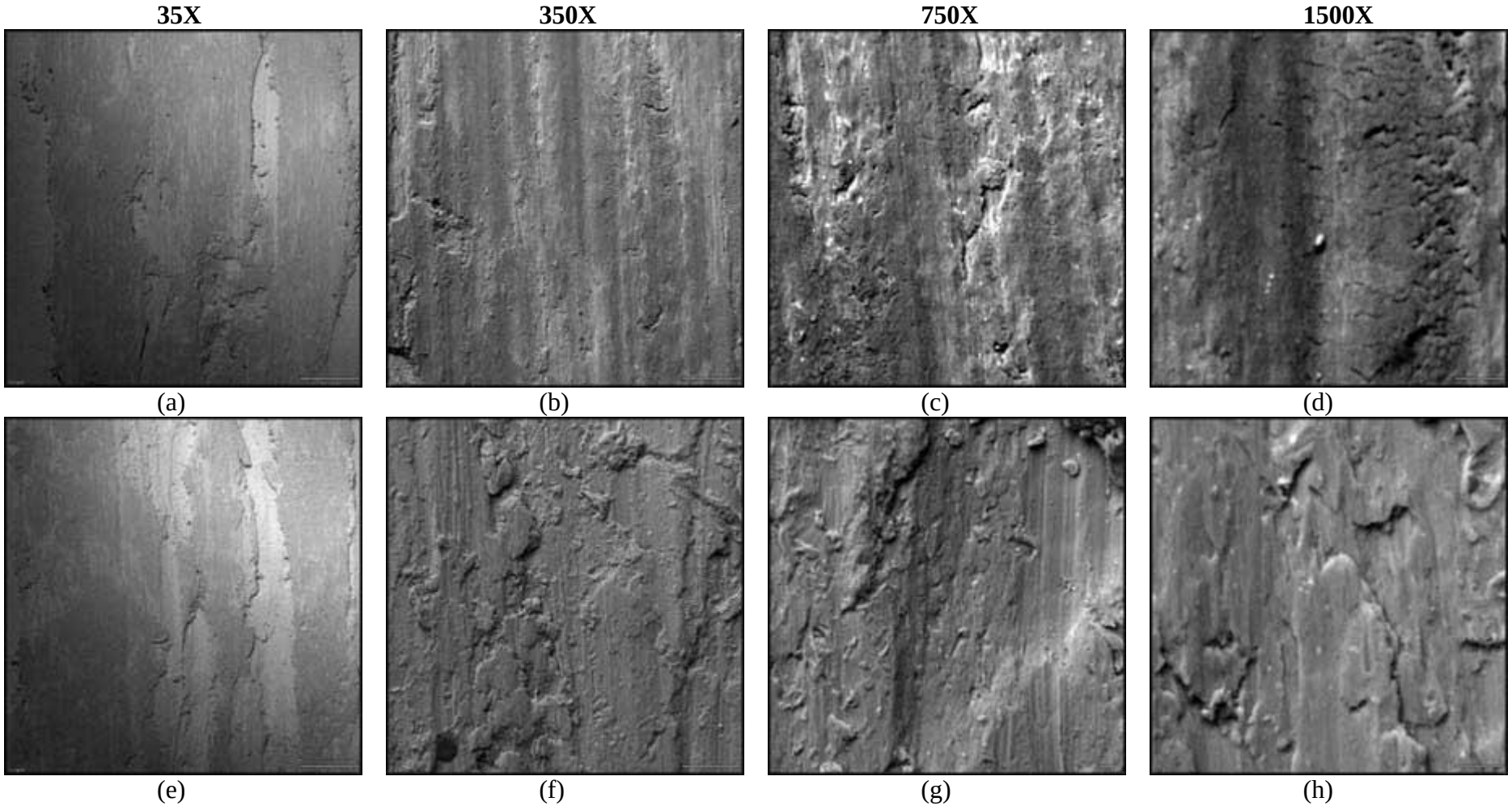
Şekil D.2. ZrO_2CaO kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



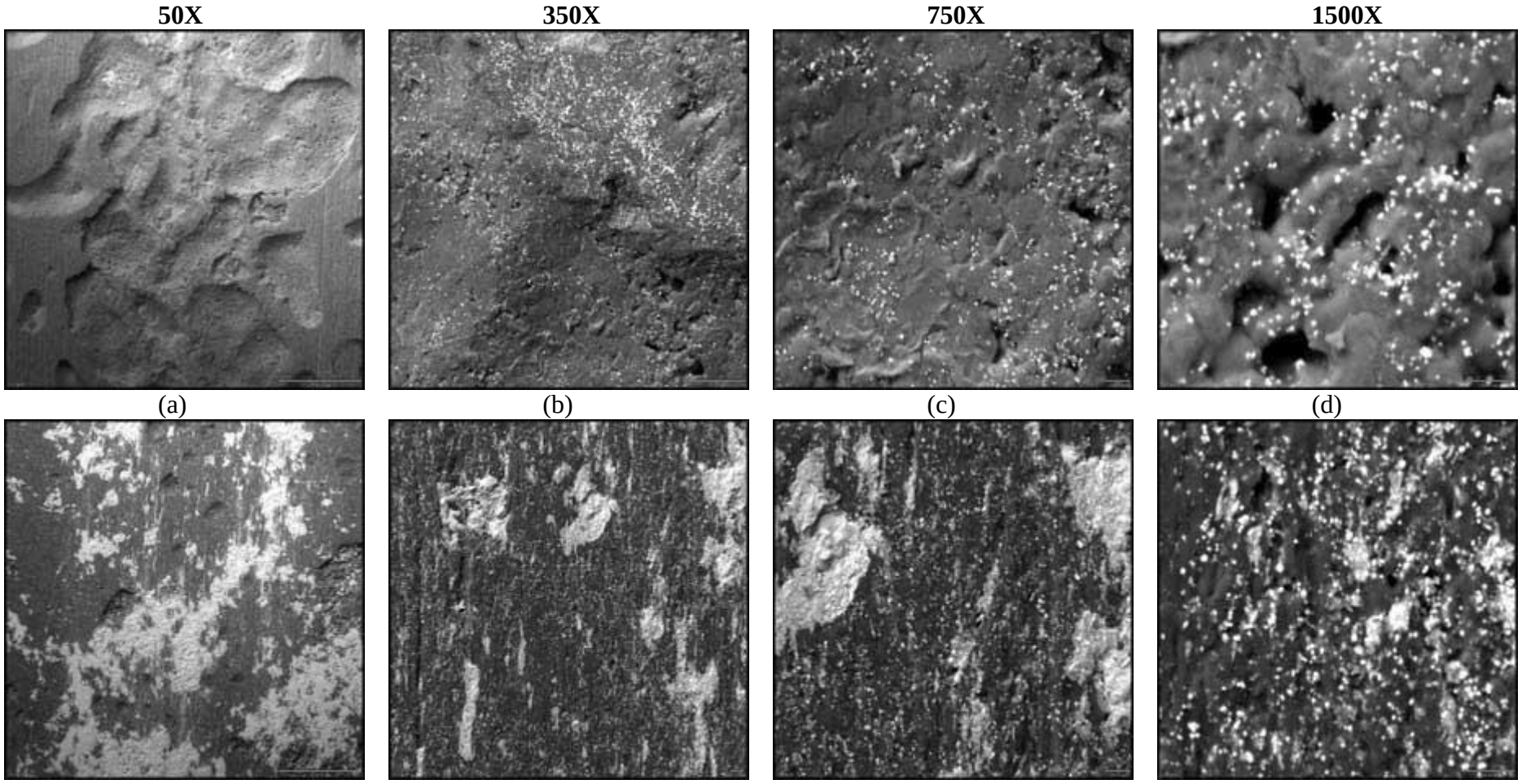
Şekil D.3. $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



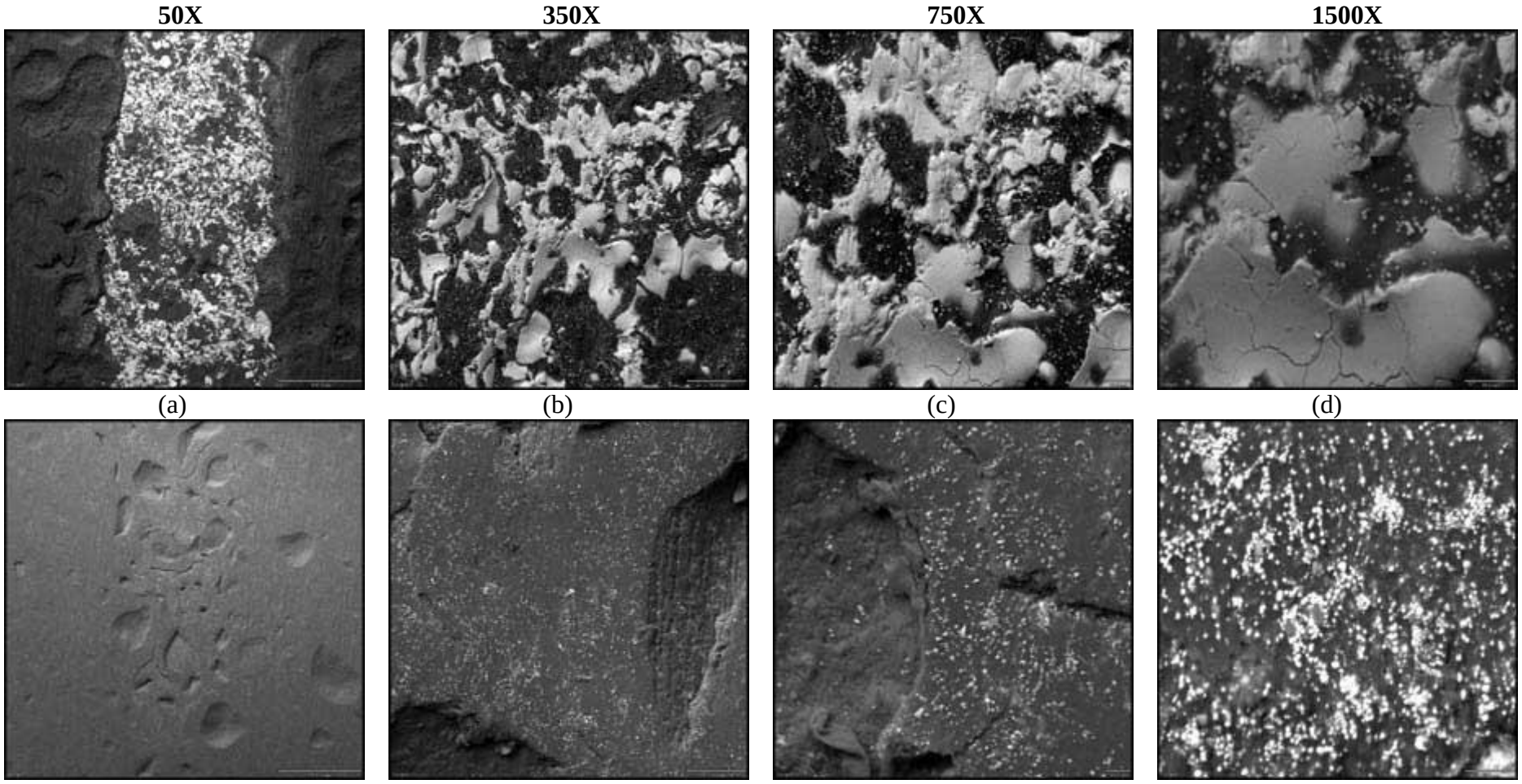
Şekil D.4. Al_2O_3 kaplamanın (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



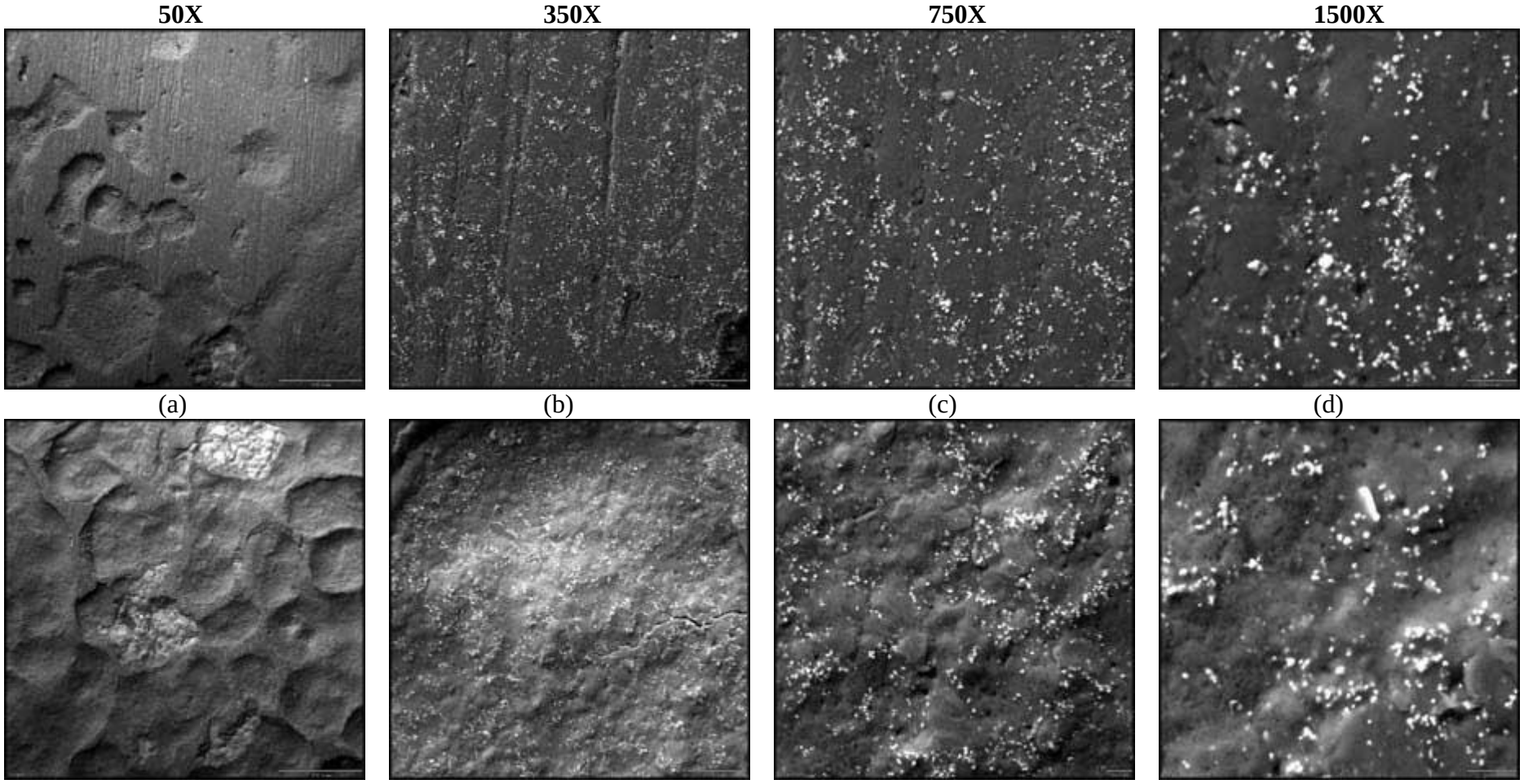
Şekil D.5. Altlık malzemenin (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



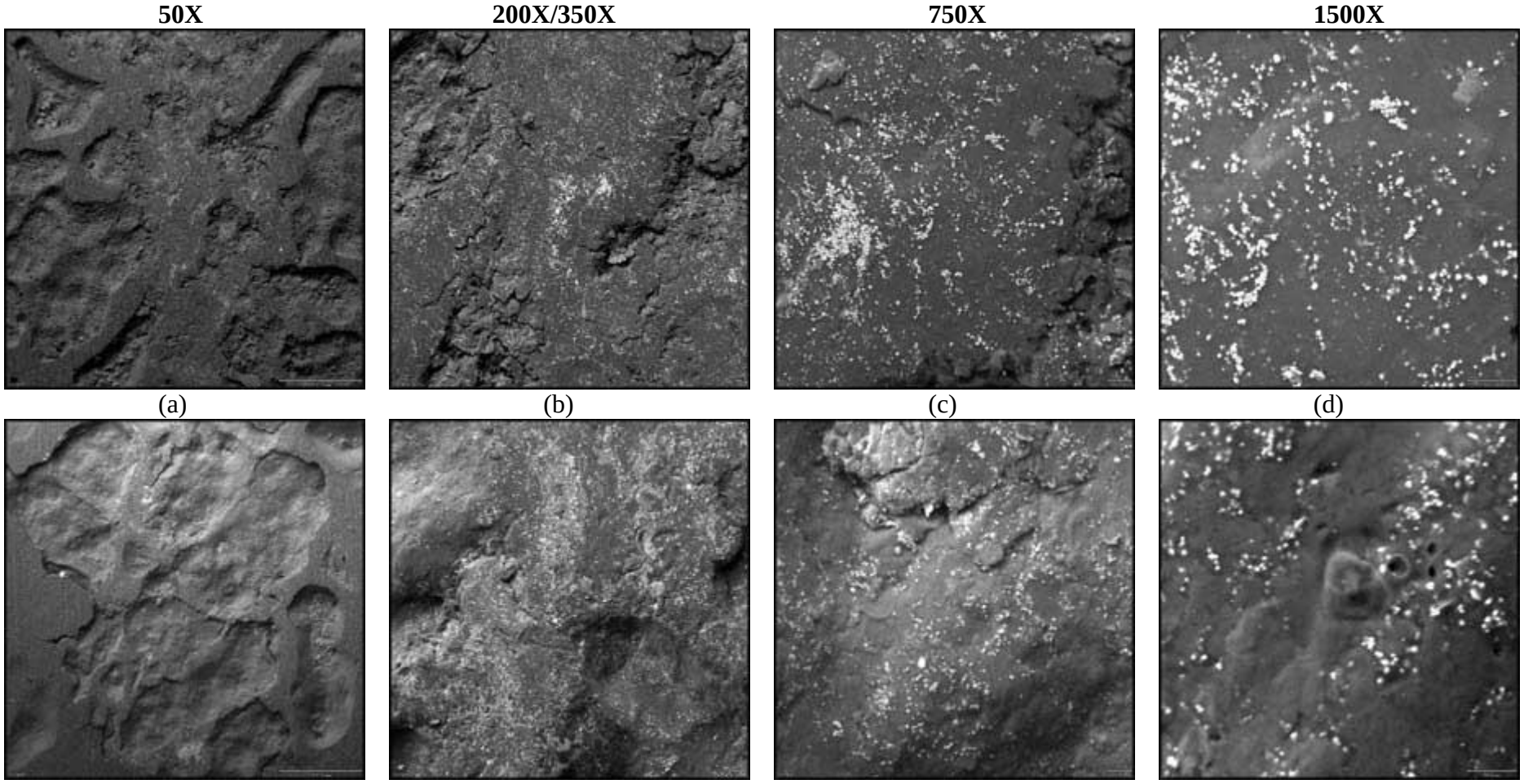
Şekil D.6. Cr_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



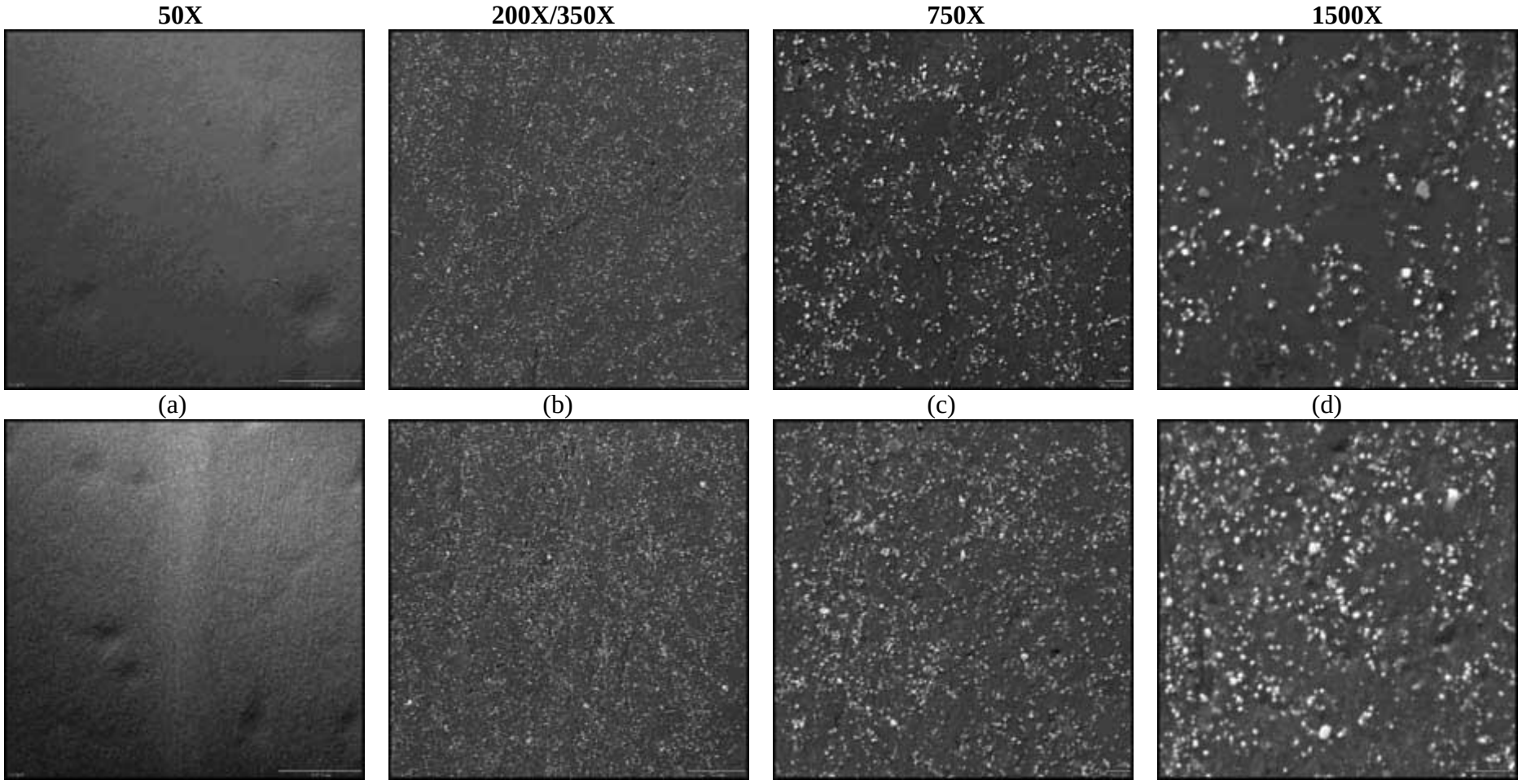
Şekil D.7. ZrO_2CaO / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).



Şekil D.8. $Al_2O_3TiO_2$ / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).

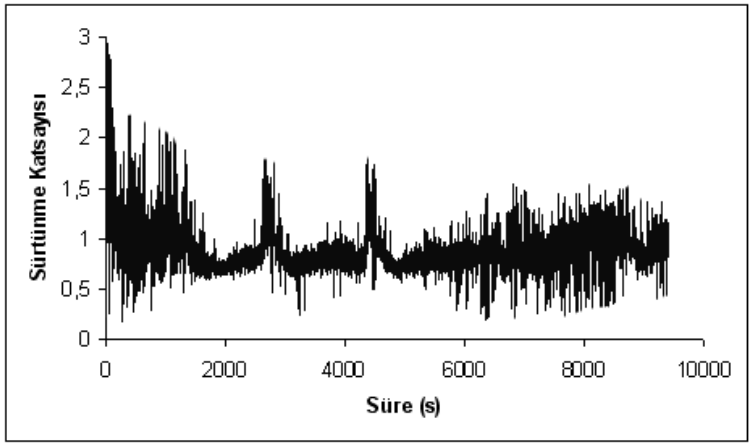


Şekil D.9. Al_2O_3 / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).

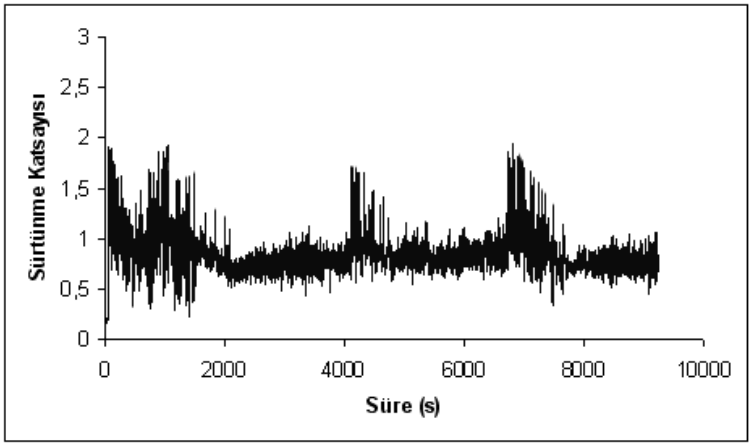


Şekil D.10. Altlık / Teflon karma kaplamasının (a-d) alümina ve (e-h) çelik bilyelerle yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri (Yük=930 g).

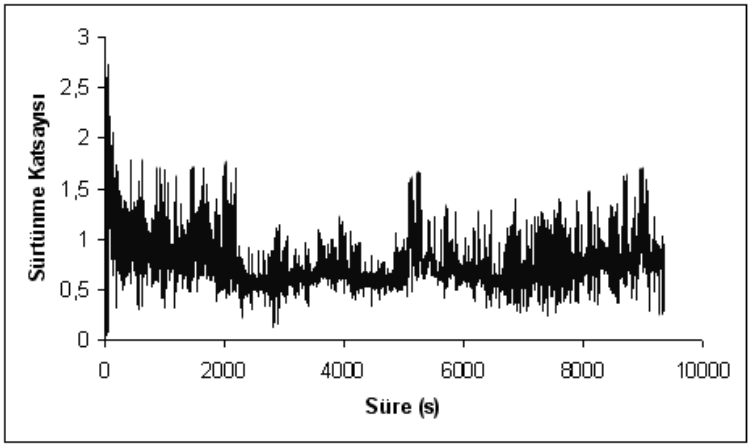
EK E



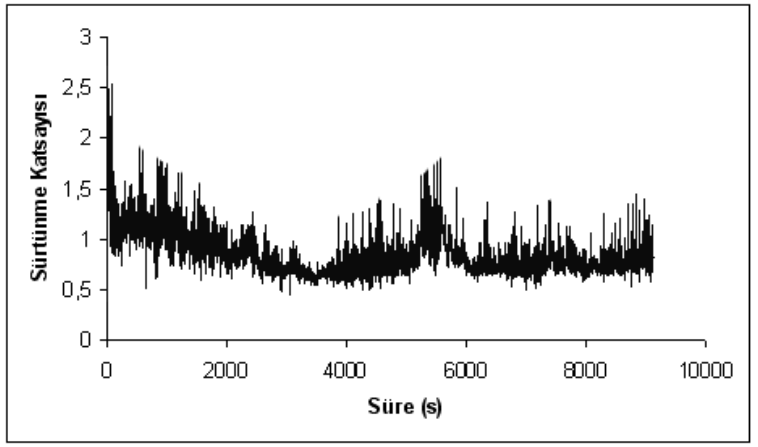
(a)



(b)

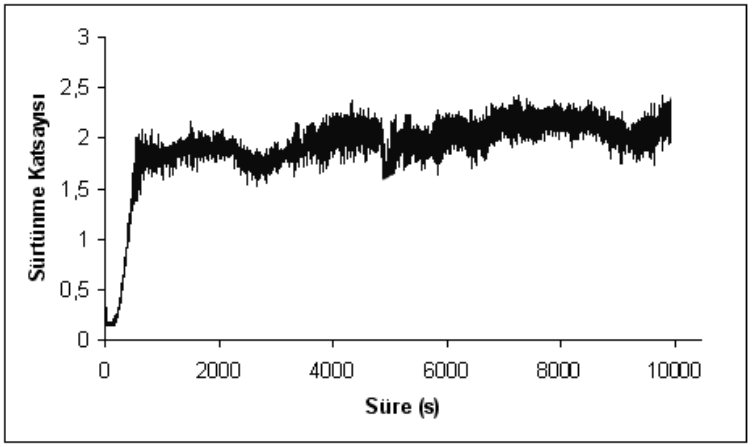


(c)

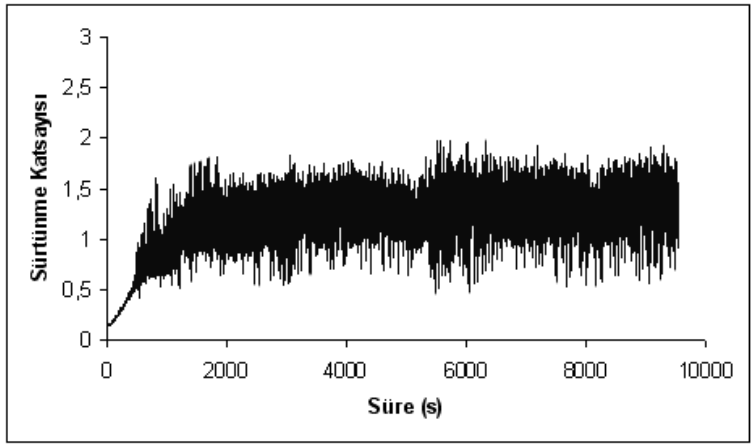


(d)

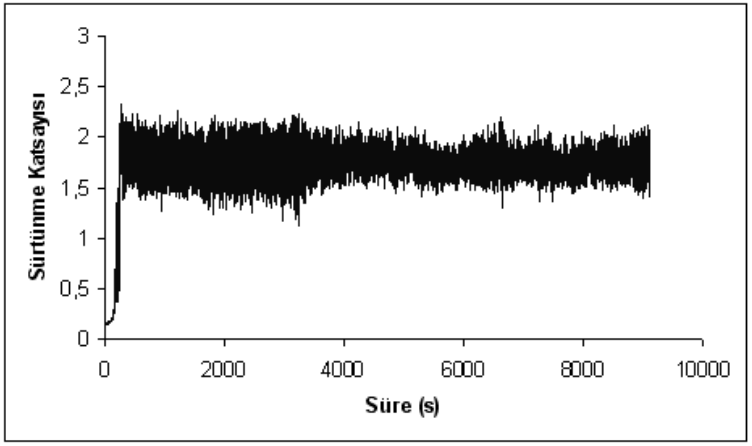
Şekil E.1. Altlık malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır).



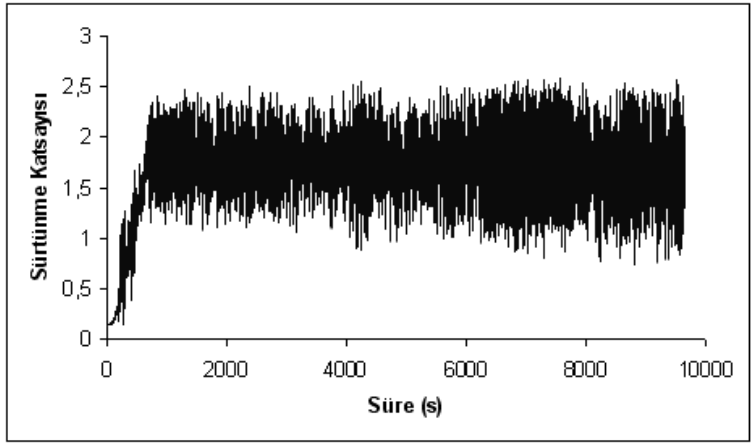
(a)



(b)

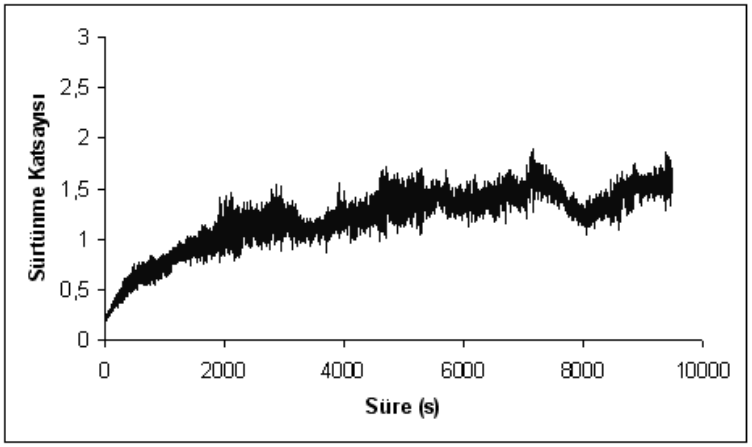


(c)

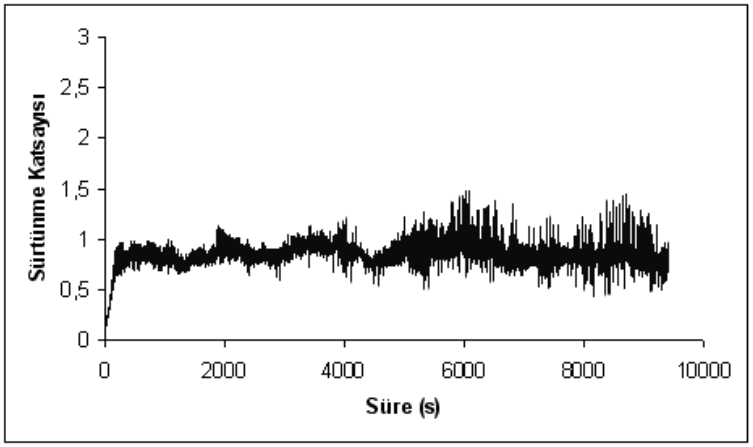


(d)

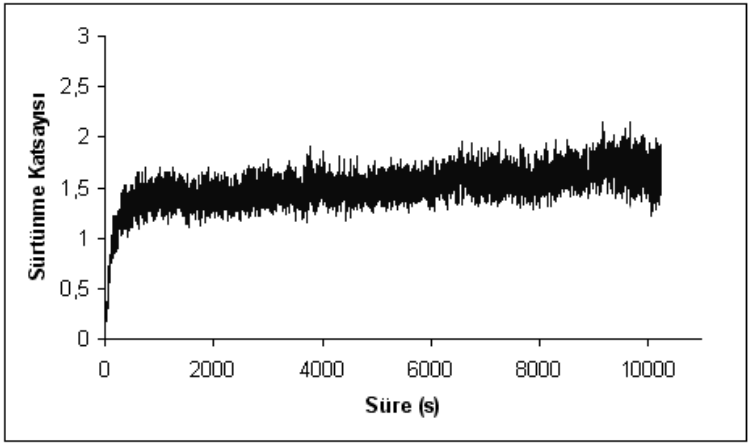
Şekil E.2. $Al_2O_3TiO_2$ kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır).



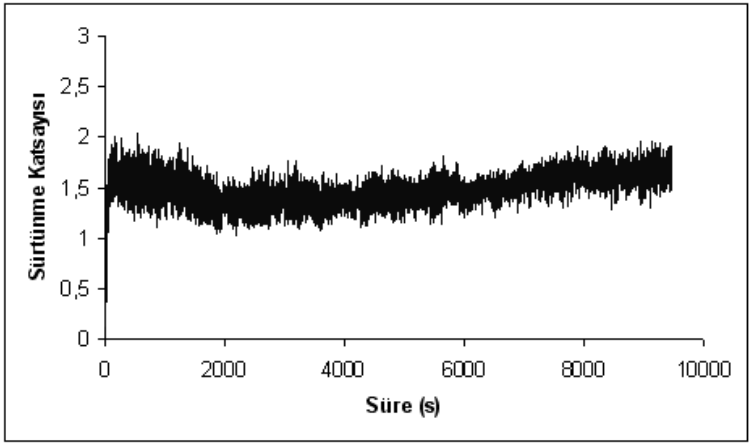
(a)



(b)

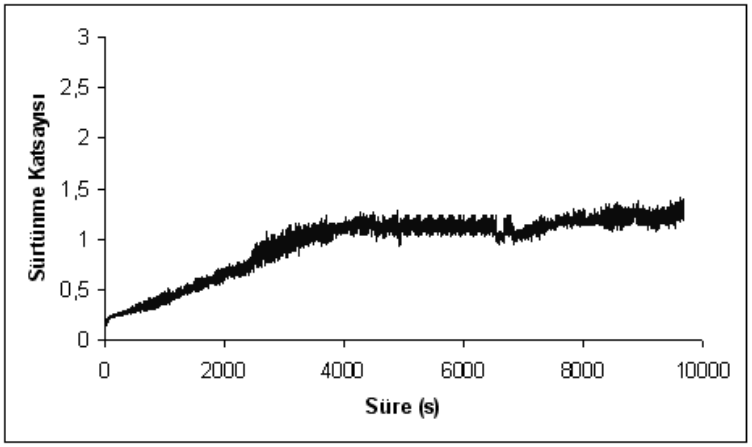


(c)

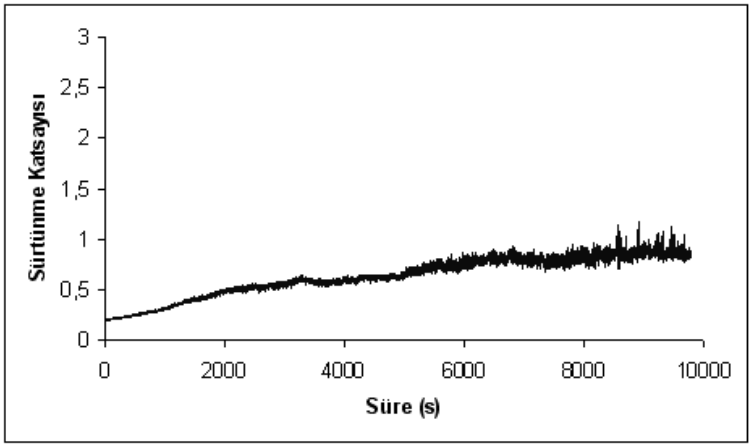


(d)

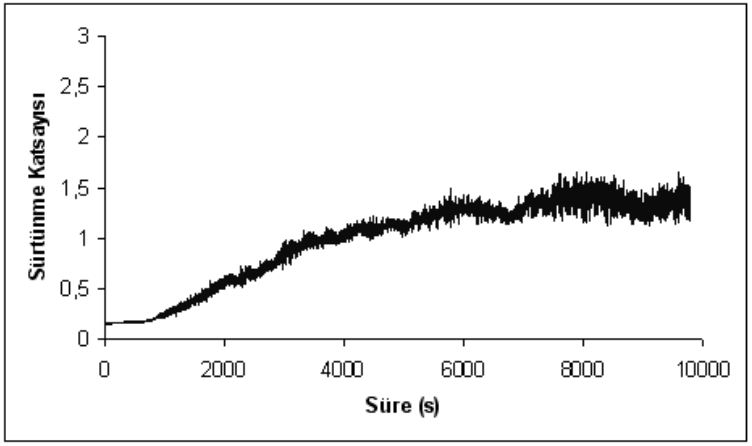
Şekil E.3. Al_2O_3 kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır).



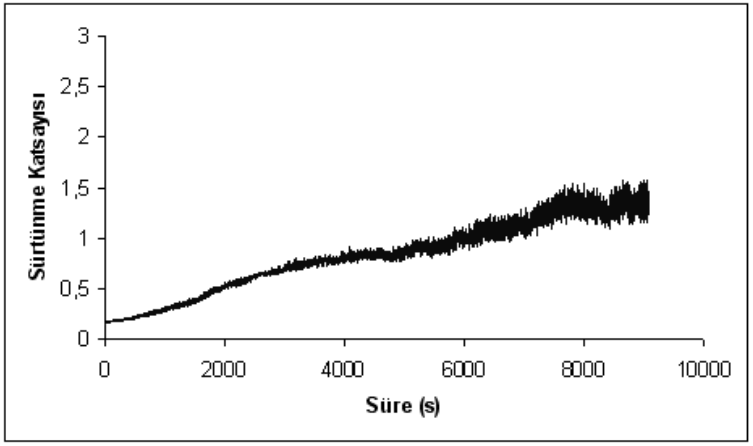
(a)



(b)

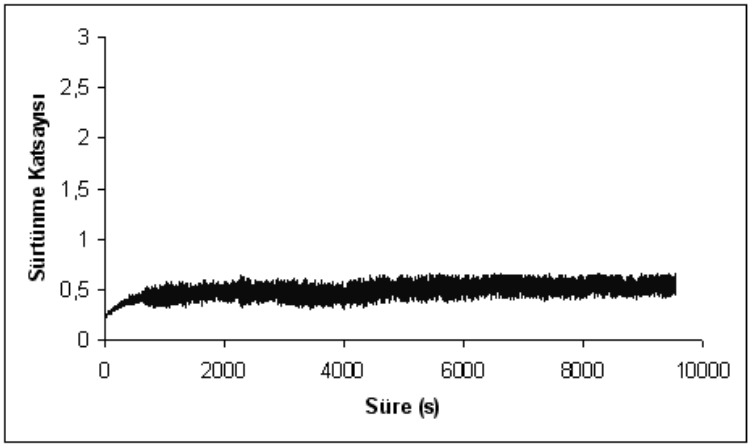


(c)

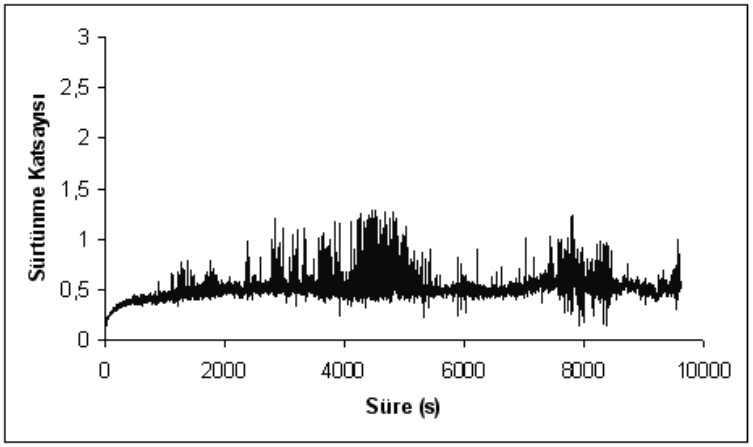


(d)

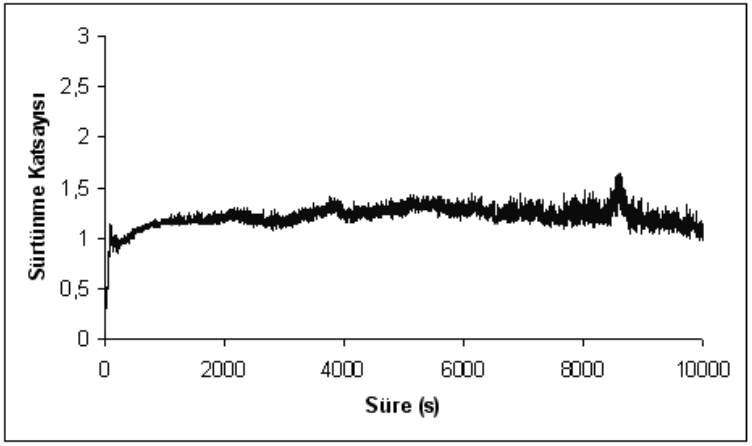
Şekil E.4. ZrO_2CaO kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır).



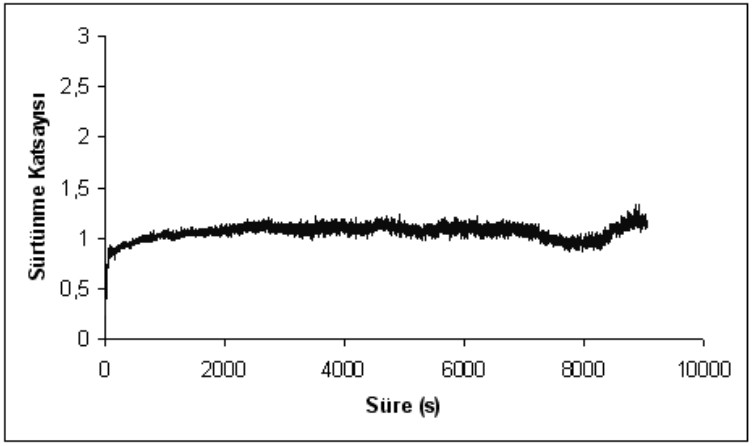
(a)



(b)

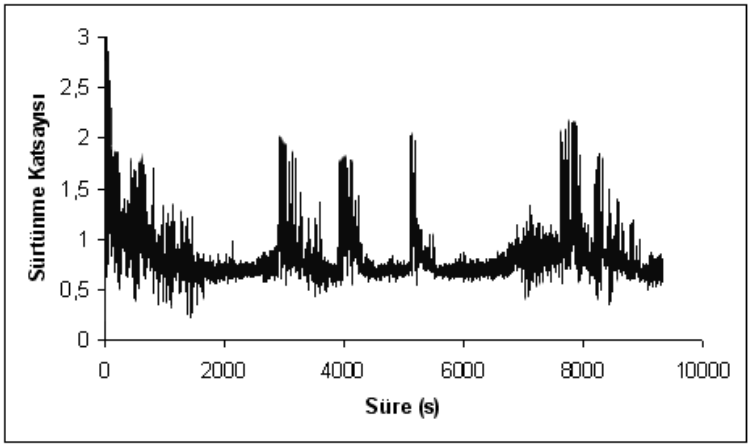


(c)

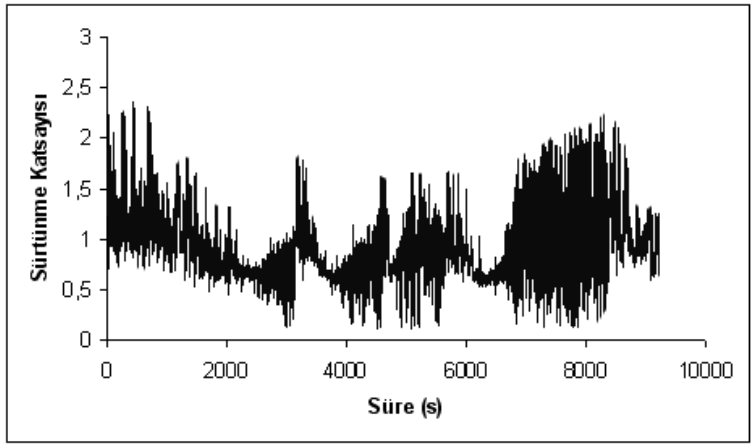


(d)

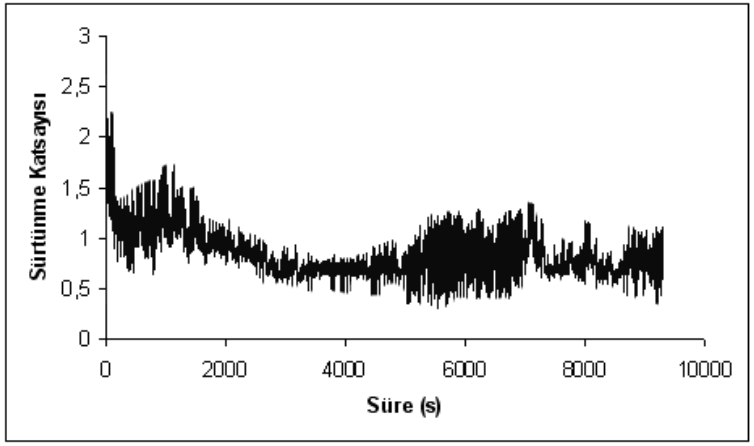
Şekil E.5.Cr_2O_3 kaplamanın a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak alümina bilye kullanılmıştır).



(a)

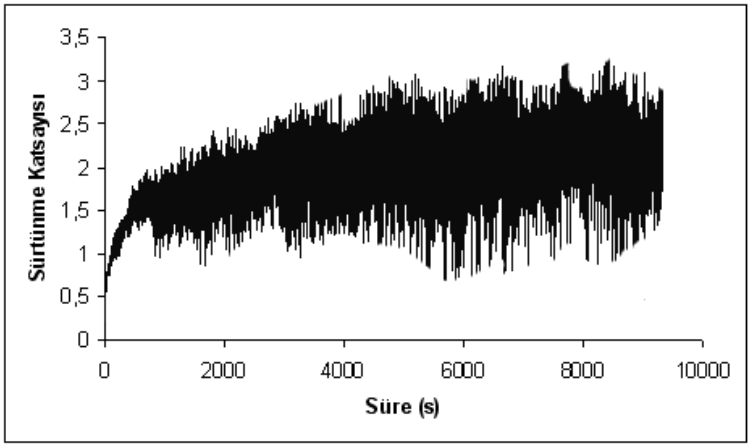


(b)

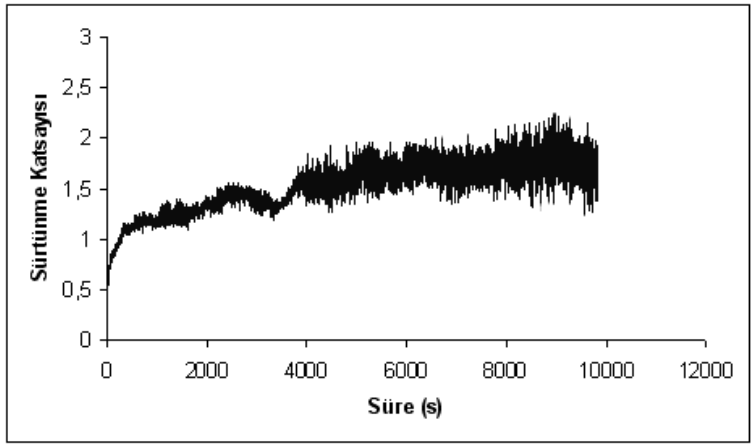


(c)

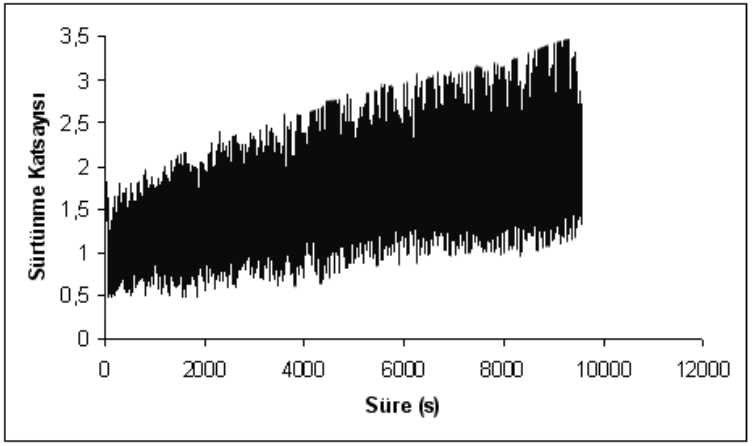
Şekil E.6. Altlık malzemenin a) 275g b) 496 g ve c) 930 g yük ile yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır).



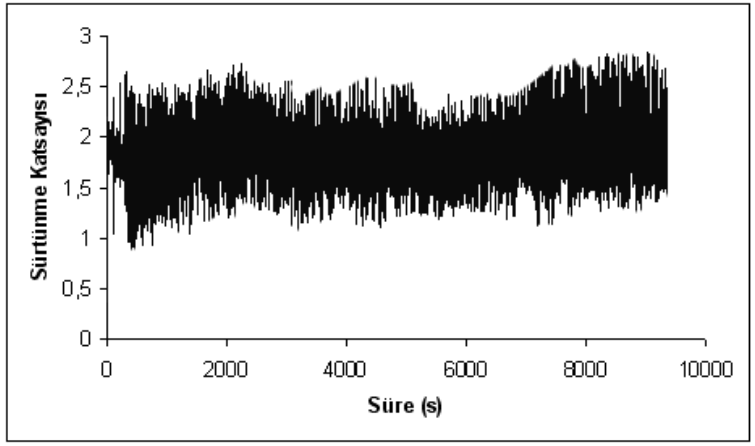
(a)



(b)

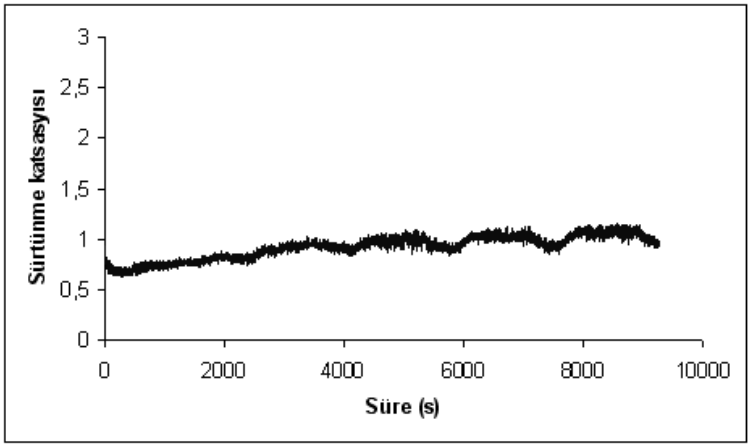


(c)

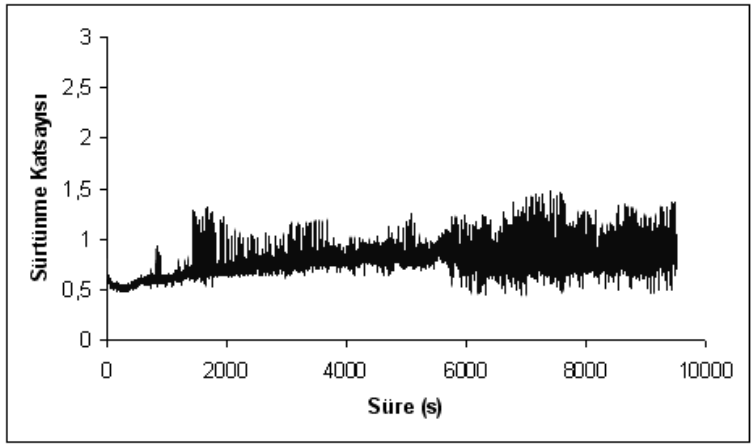


(d)

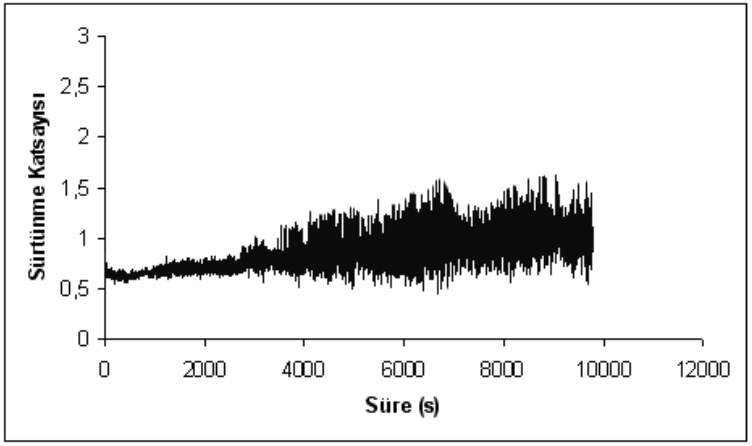
Şekil E.7. ZrO_2CaO malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır).



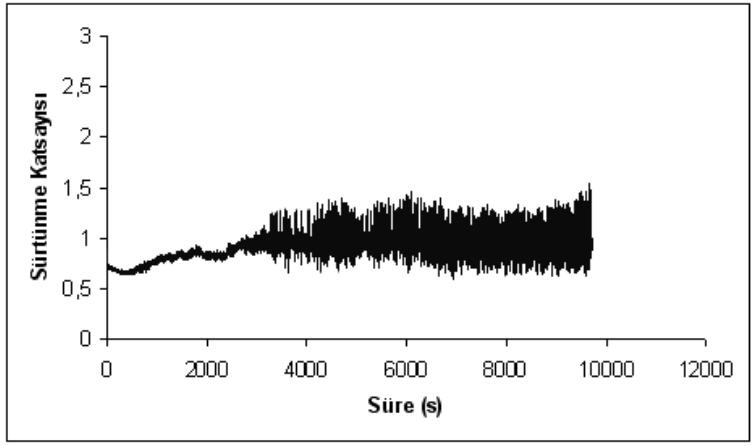
(a)



(b)

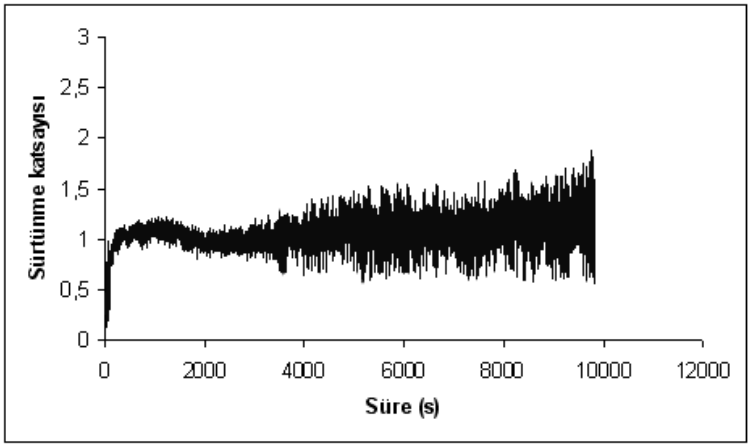


(c)

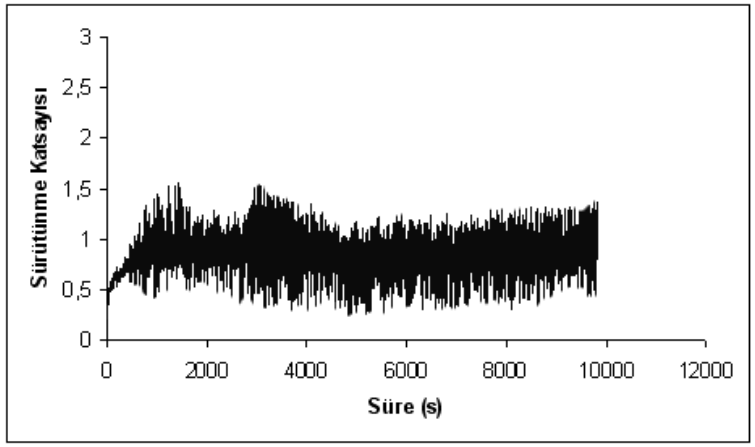


(d)

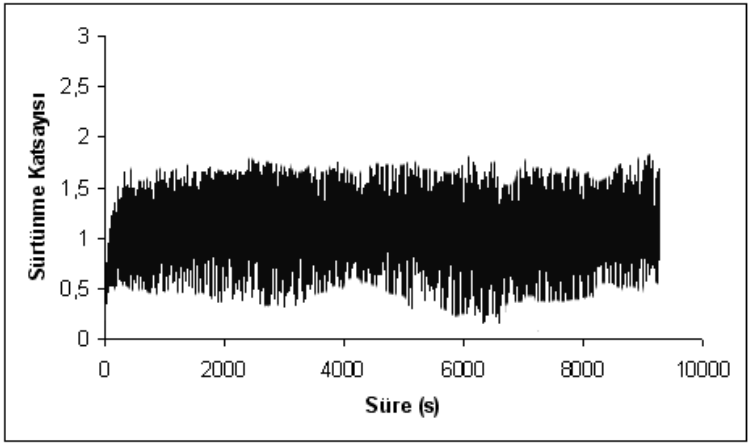
Şekil E.8. Al_2O_3 malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır).



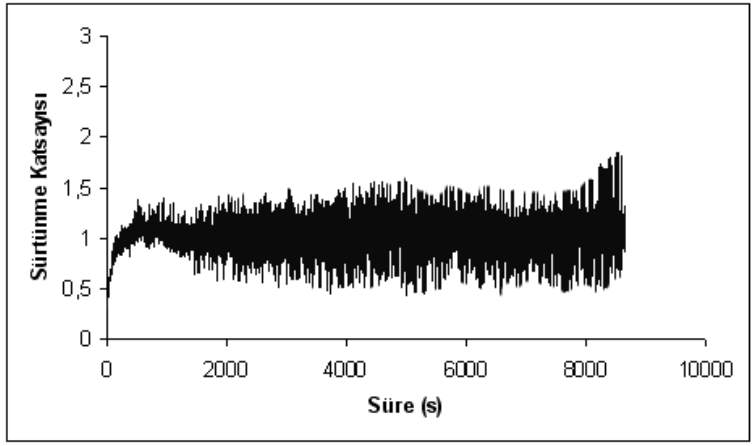
(a)



(b)

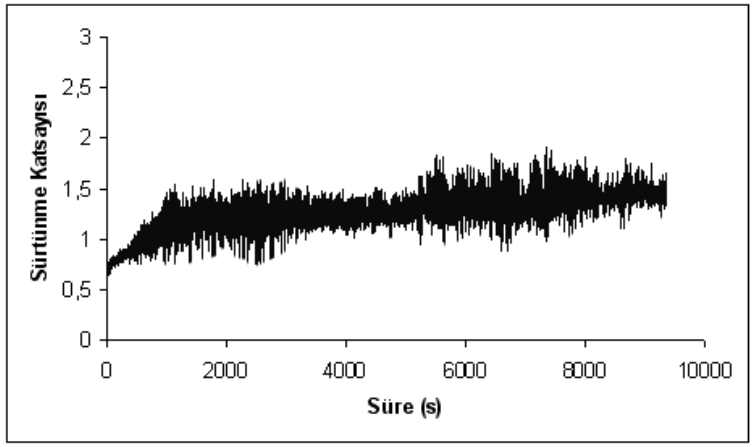


(c)

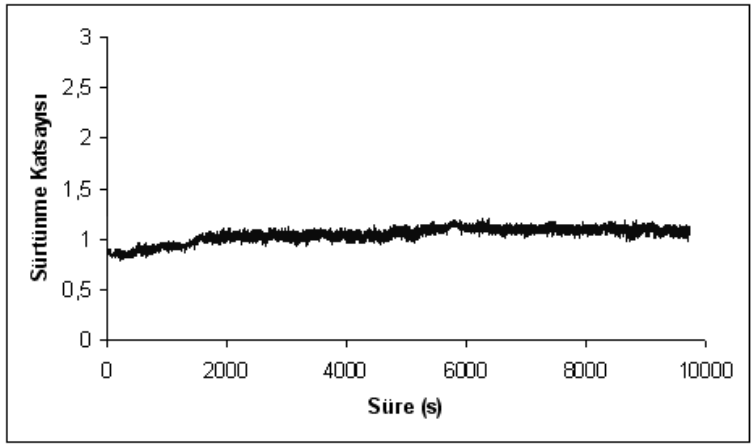


(d)

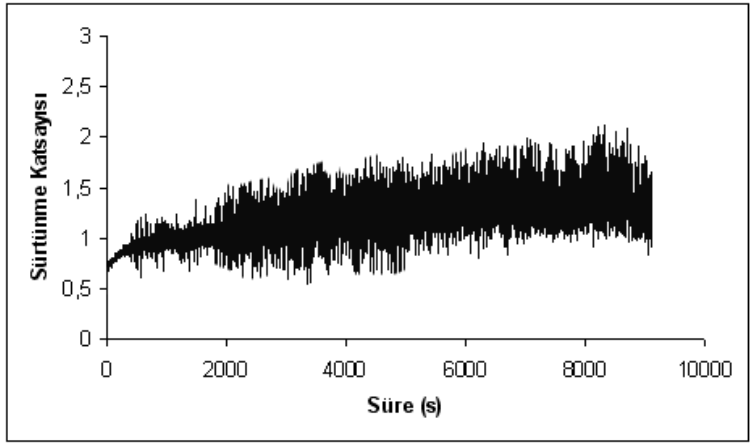
Şekil E.9. $Al_2O_3TiO_2$ malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır).



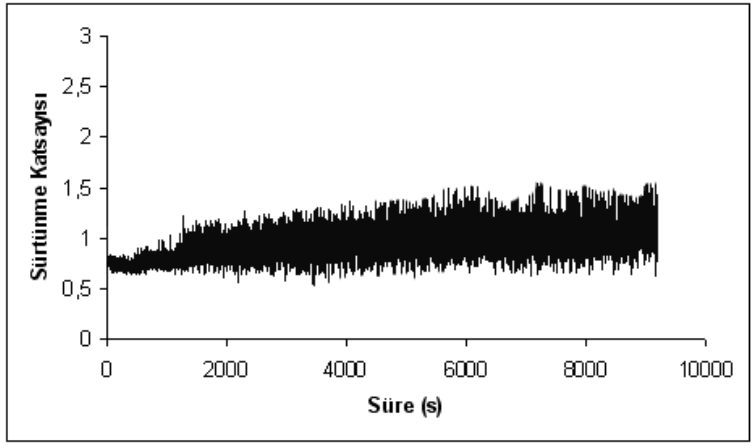
(a)



(b)

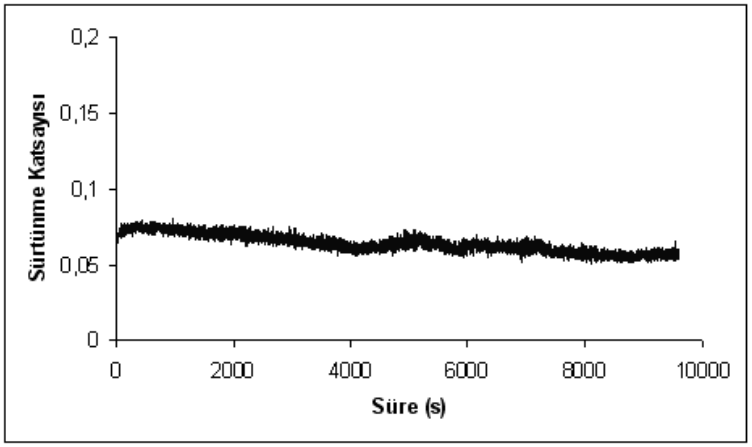


(c)

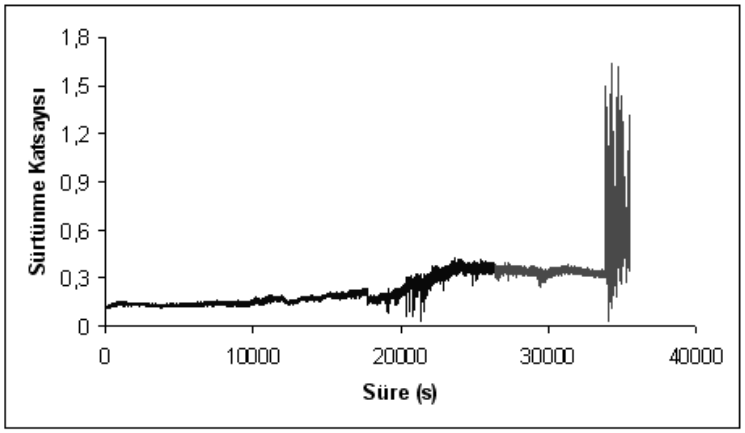


(d)

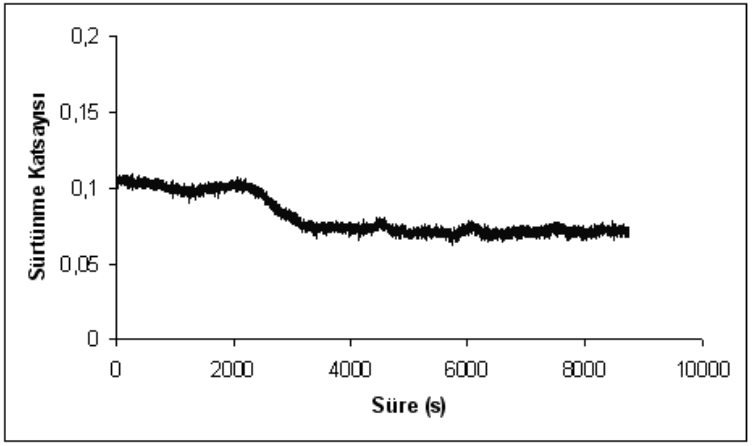
Şekil E.10. Cr_2O_3 malzemenin a) 275g b) 496 g c) 737 g ve d) 930 g yük ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi (Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılmıştır).



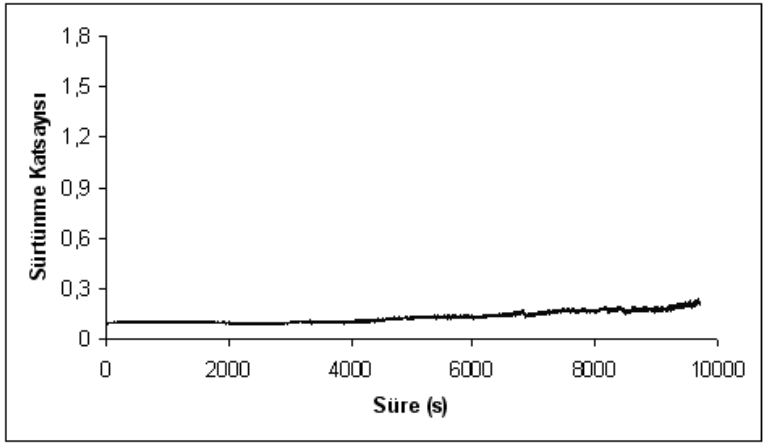
(a)



(b)

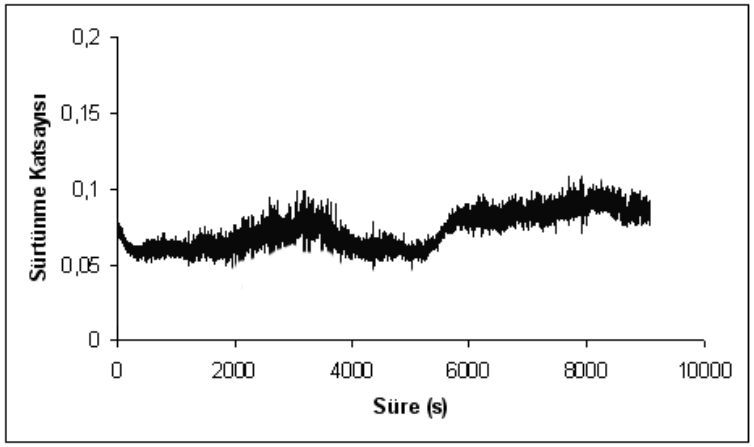


(c)

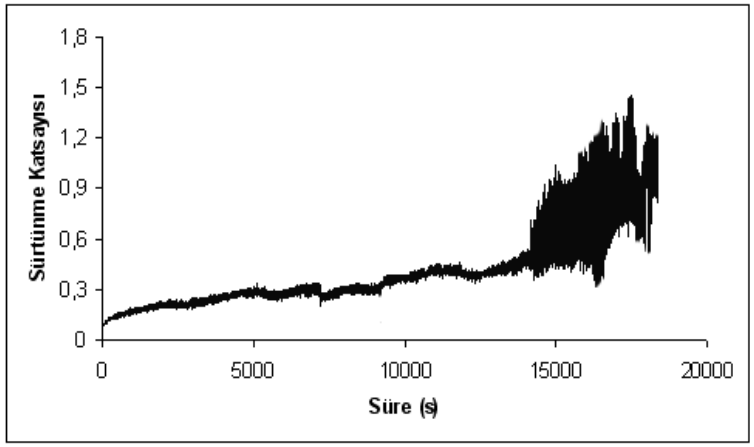


(d)

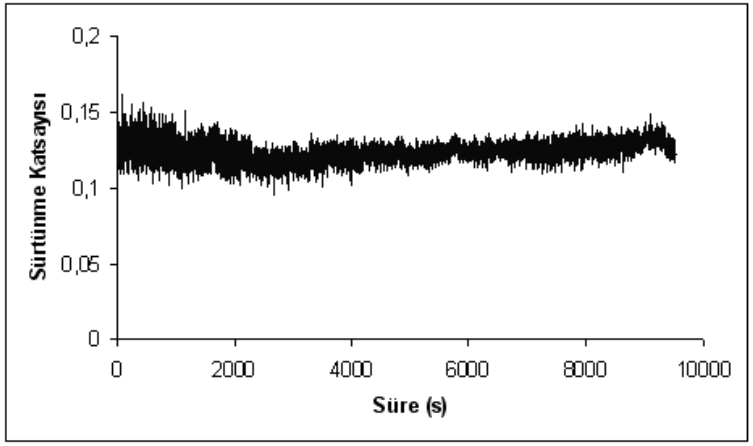
Şekil E.11. Çıplak altlık üzerine kaplanan teflonun a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi.



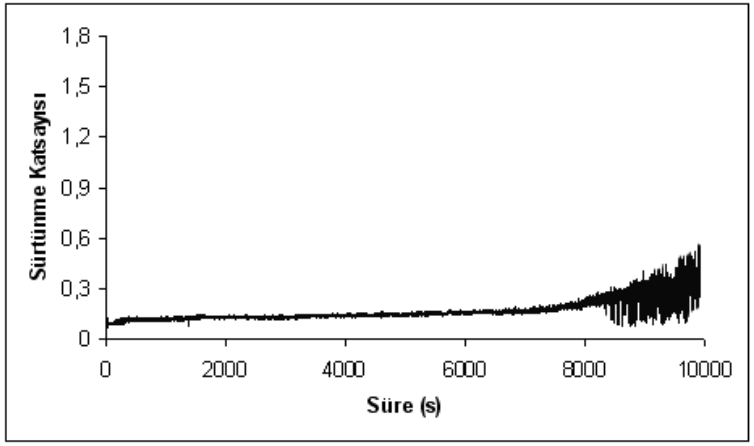
(a)



(b)

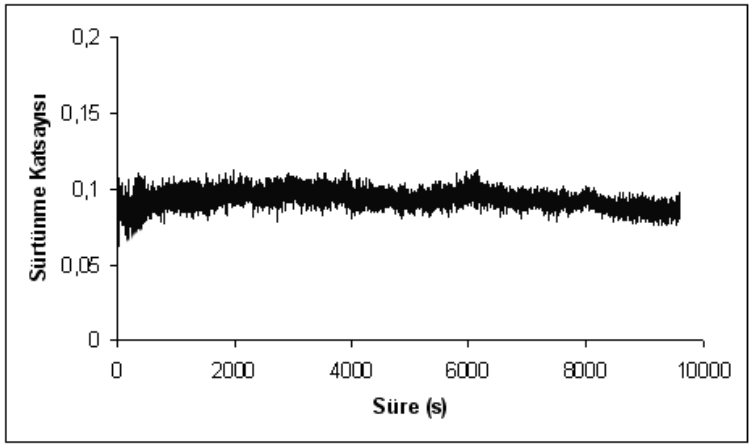


(c)

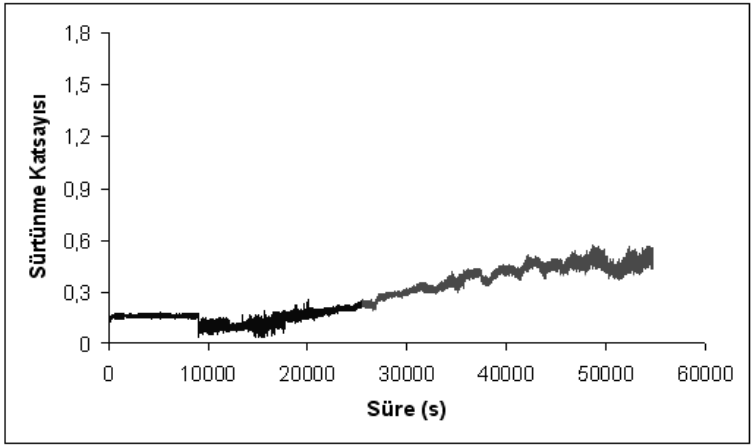


(d)

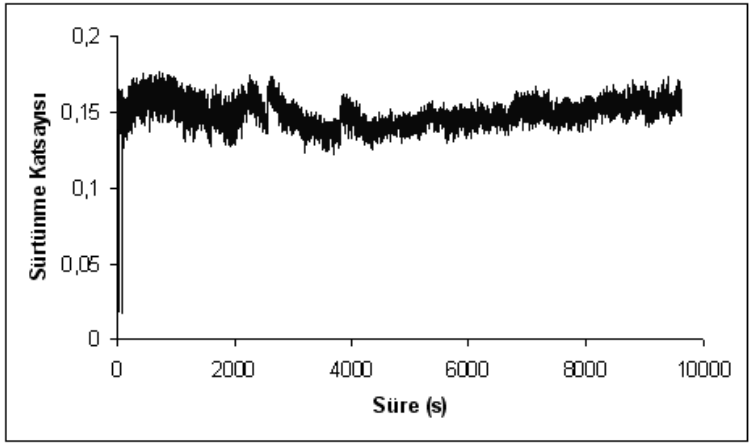
Şekil E.12. $Al_2O_3TiO_2$ / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi.



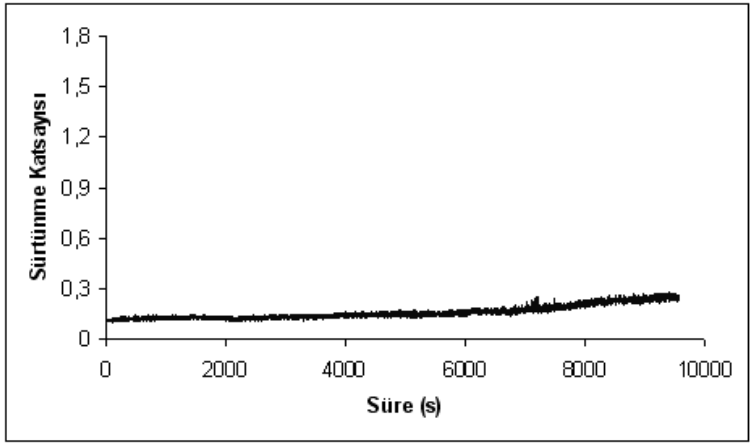
(a)



(b)

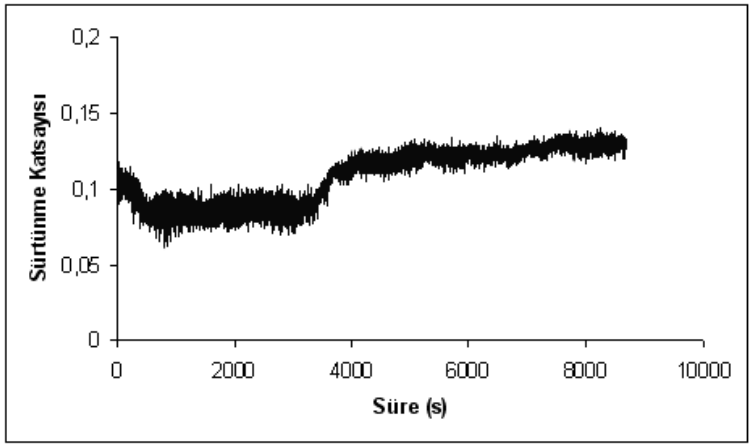


(c)

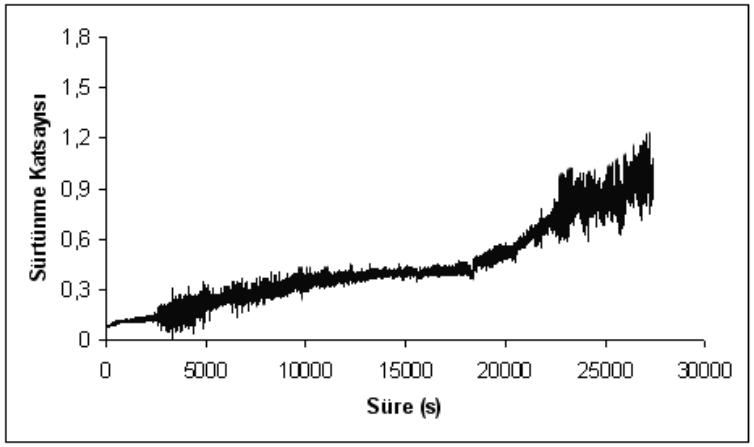


(d)

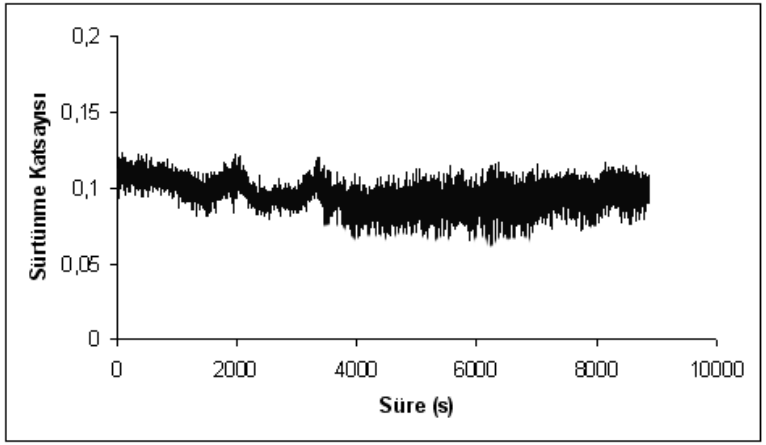
Şekil E.13. Al_2O_3 / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi.



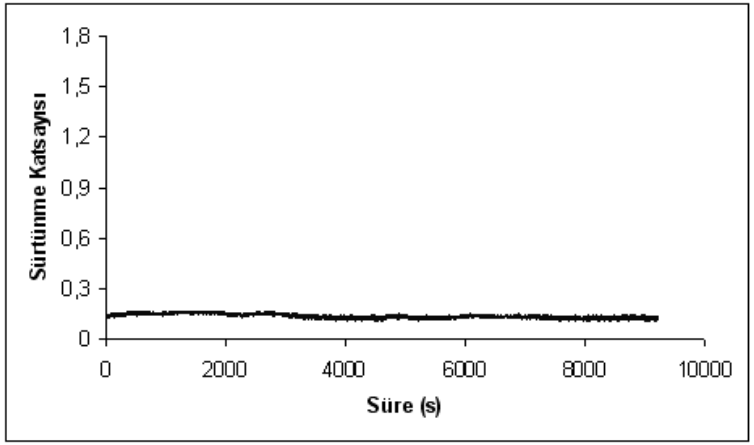
(a)



(b)

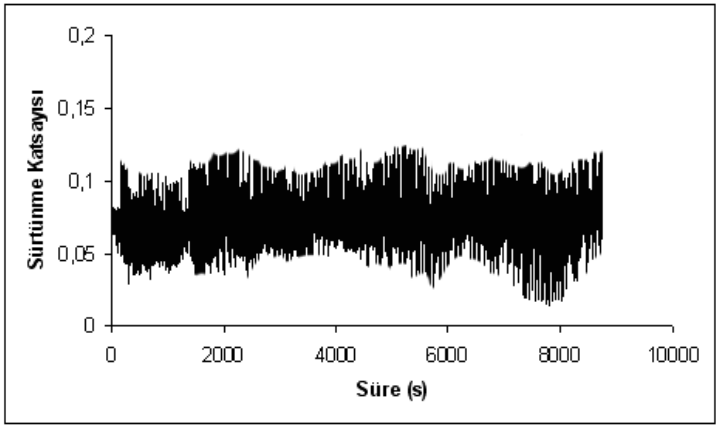


(c)

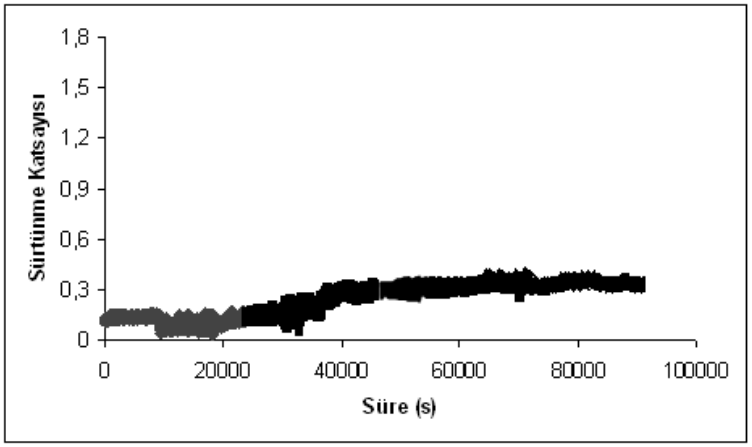


(d)

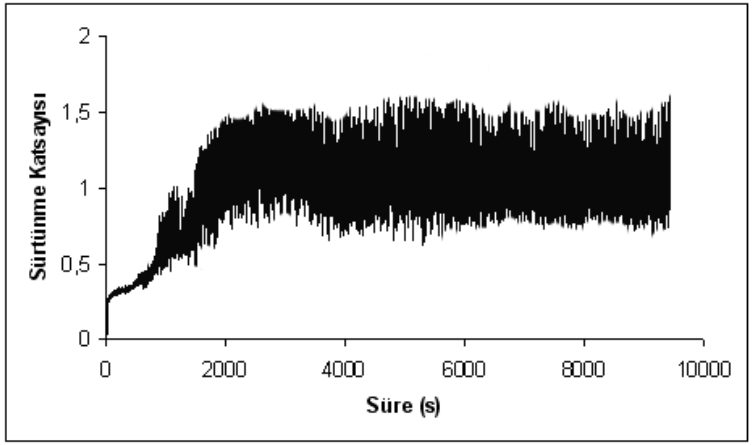
Şekil E.14. ZrO_2CaO / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi.



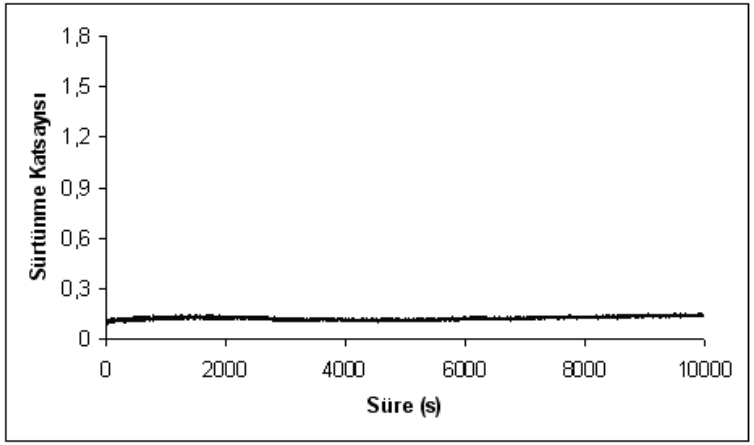
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil E.15. Cr_2O_3 / Teflon karma kaplamanın a) alümina bilye-930 g, b) alümina bilye 1558 g, c) çelik bilye 930 g, d) çelik bilye 1558 g ile yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının süreyle değişimi.

ÖZGEÇMİŞ

Ufuk AKIN aslen Düzce'li olup 1980 yılında Erzurum 'da doğdu. 1997 yılında İstanbul Kartal Süleyman Demirel Lisesi 'nde orta öğretimini tamamladıktan sonra, aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü'nde yüksek öğrenimine başladı ve 2001 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programında Yüksek Lisans eğitimine başladı.